

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
MATERIAALI- JA KALLIOTEKNIIKAN OSASTO
MEKAANISEN PROSESSI- JA KIERRÄTYSTEKNIIKAN LABORATORIO

Mika Lindqvist

Sähkö- ja elektroniikkaromun teknis-taloudellinen tarkastelu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 22.04.2002.

Työn valvoja

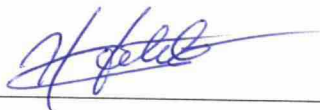


Professori Kari Heiskanen

Työn ohjaajat



DI Pia Voutilainen



DI Harri Lehto

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Espoossa Outokumpu Oyj:n Outokumpu Copper Products-yksikössä 1.9.2001. – 15.4.2002. Outokumpu Copper Products:ia kiitän työni rahoituksesta sekä puitteiden järjestämisestä.

Outokumpu Copper Products:issa kiitän erityisesti työni ohjaajaa Pia Voutilaista mielenkiintoisesta työn aiheesta, asiantuntevista neuvoista sekä henkisestä tuesta yritysvierailuilla.

TKK:ssa kiitos työni valvojalle Kari Heiskaselle sekä ohjaajalle Harri Lehdolle, jotka auttoivat löytämään uusia näkökulmia ja visioita työni aihetta koskien.

Kiitän myös muuta Outokumpu Copper Products:in henkilökuntaa, jotka ovat työni valmistumista edesauttaneet.

Kiitos seuraaville yrityksille, jotka ovat auttaneet minua tässä prosessissa: Ekokem Oy, Kuusakoski Oy, Nokia Oyj, Loimi-Hämeen Jätehuolto Oy, SER-tuottajayhteisö ja Outokumpu Poricopper.

Kiitos Ninalle oikoluvusta ja kannustuksesta tuskaisina hetkinä.

Espoossa 22.04.2002.



Mika Lindqvist



TEKNILLINEN KORKEAKOULU**DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ**

Tekijä:	Mika Lindqvist
Työn nimi:	Sähkö- ja elektroniikkaromun teknis-taloudellinen tarkastelu
Päivämäärä:	22.04.2002
Sivumäärä:	80
Osasto:	Materiaali- ja kalliotekniikan osasto
Professuuri:	Mekaaninen prosessi- ja kierrätystekniikka
Työn valvoja:	Professori Kari Heiskanen
Työn ohjaajat:	DI Pia Voutilainen ja DI Harri Lehto
Avainsanat:	Sähkö- ja elektroniikkaromu, kierrätys, elinkaarianalyysi, matkapuhelin
<p>Työ käsittelee sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätystä. EU:n alueella astunee voimaan vuoden 2002 aikana lainsäädäntö, jonka mukaan sähkö- ja elektroniikkalaitteille on järjestettävä oma keräysjärjestelmä. Laitteiden keräyksestä ja rahoituksesta vastaavat laitteiden tuottajat ja maahantuojat. Tuottajilla on useita mahdollisuuksia järjestää keräys.</p> <p>Uuden lainsäädännön keskeiset tavoitteet ovat kansallisten lainsäädäntöjen yhtenäistäminen, romun ennaltaehkäisy ja vähentäminen, uusiokäytön, talteenoton ja kierrätyksen edistäminen sekä käsittelyyn ja hävittämiseen liittyvien ympäristöriskien minimoiminen.</p> <p>Elinkaarianalyysi on hyvä apuväline tutkittaessa tietyn tuotteen ympäristövaikutuksia. Elinkaarianalyysissä tarkastellaan ympäristövaikutuksia koko tuotteen elinkaaren aikana: raaka-aineiden tuotanto, valmistus, kuljetus, käyttö, keräys ja kierrätys. Sähkö- ja elektroniikkalaitteilla ympäristövaikutukset vaihtelevat suuresti eri tuoteryhmien välillä, myös eri elinkaaren vaiheissa.</p> <p>Sähkö- ja elektroniikkaromun käytön jälkeisiin toimintoihin on olemassa useita vaihtoehtoja. Tuote voidaan käyttää uudelleen, tuotteen osia voidaan käyttää uudelleen, materiaalit voidaan kierrättää/hyödyntää tai materiaali voidaan loppusijoittaa kaatopaikalle. Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätys on hankalaa, koska siinä esiintyy lukuisia eri materiaaleja ja komponentteja. Kierrätysprosessissa voidaan erottaa seuraavat vaiheet: esikäsittely, erotusprosessit ja loppusijoitus/polttaminen.</p> <p>Matkapuhelimen materiaalisällöstä suuri osa on muovina. Mikäli muoviosia korvattaisiin metalliosilla, saadaan huomattavasti ympäristöystävällisempi puhelin; metallien tuotanto ja kierrätys on ympäristöystävällisempää kuin muovien. Myös lainsäädäntö tukee metallien materiaalisuuden kasvattamista matkapuhelimissa.</p>	

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**ABSTRACT OF
MASTER'S THESIS**

Author:	Mika Lindqvist
Title of thesis:	Technical Management of Electronic Scrap Processing
Date:	22.04.2002
Number of pages:	80
Department:	Department of Materials Science and Rock Engineering
Chair:	Mak-46 Mechanical Process- and Recycling Technology
Supervisor:	Professor Kari Heiskanen
Instructor:	M.Sc. Pia Voutilainen, M.Sc. Harri Lehto
Keywords:	Waste of electronic and electric appliances, recycling, life-cycle analysis, cellular phone
<p>This study deals with recycling of electronic and electric appliances. In EU member states there will be a new legislation, which legislates that there should be separate collection system for electronic and electric appliances. The producers and importers of appliances will be responsible for collecting and financing the system. They have several possibilities to organize the collection.</p> <p>The key objectives in legislation are harmonization of national legislations, prevention and reduction of scrap, promotion of recovery and recycling, minimizing the risks concerning handling and disposal.</p> <p>Life-cycle analysis is a good tool when you want to research the environmental effects of the product. In life-cycle analysis the environmental impacts are examined during the whole life cycle of the product: production and manufacturing of materials, transportation, usage, collection and recycling. In electronic and electric appliances the environmental effects vary greatly between different product groups, also in the different phases in life cycle.</p> <p>For electronic and electric appliances there are many options for the end-of-use products. The product or the components can be remanufactured, the materials can be recycled/exploited or materials could be disposed in landfills. Recycling of the electronic and electric appliances is difficult, because there are numerous different materials and components. The recycling process could be divided in the following stages: pretreatment, separating processes and disposal/incineration.</p> <p>The great part of the material content of a cellular phone is plastic. If the plastic parts are replaced with metal parts, the cellular phone will be more environmentally friendly: the production and recycling of metals is more environmentally sound than of plastics. The new legislation also supports the increase of metals usage in cellular phones.</p>	

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	9
2	LAINSÄÄDÄNTÖ.....	11
2.1	TAUSTAA	11
2.2	PERUSTELUT	11
2.2.1	Tuottajan vastuuta koskeva periaate.....	11
2.2.2	SER:n määrän lisääntyminen	12
2.2.3	SER:n huollon nykytilanne	12
2.2.3.1	SER:n polttaminen	13
2.2.3.2	SER:n sijoittaminen kaatopaikoille.....	14
2.2.3.3	SER:n kierrätys.....	15
2.2.4	Kansalliset lainsäädännöt	15
2.2.5	Vaaralliset aineet.....	16
2.2.6	Taloudellinen arviointi	18
2.2.6.1	Toteuttamiskustannukset	18
2.2.6.2	Direktiiveillä saavutettavat hyödyt	19
2.3	WEEE-DIREKTIIVI.....	20
2.3.1	Tavoitteet (1. artikla).....	20
2.3.2	Soveltamisala (2. artikla).....	20
2.3.3	Määritelmät (3. artikla)	21
2.3.4	Toimenpiteet kierrätyksen parantamiseksi	21
2.3.5	Erillinen keräys (4. artikla).....	22
2.3.6	Esikäsittely (5. artikla)	22
2.3.7	Hyödyntäminen (6. artikla)	24
2.3.8	Rahoitus (7. ja 8. artikla).....	24
2.3.9	Tiedotus (9.- 12. artikla).....	25
2.4	ROHS-DIREKTIIVI	25
3	ELINKAARIANALYYSI	27
3.1	YMPÄRISTÖMÖTÄINEN TUOTESUUNNITTELU	29
3.2	KERÄYSJÄRJESTELMÄ.....	31
3.2.1	Tuottajat ostavat kierrätyspalvelut kollektiivisesti	31
3.2.2	Tuottaja siirtää vastuunsa kolmannelle osapuolelle (tuottajayhteisö)	33
3.2.3	Kierrätysvakuutus.....	34

3.2.4	Tuottajan oma kierrätysjärjestelmä	35
3.3	KÄYTÖN JÄLKEISET TOIMINNOT	36
3.3.1	Uudelleenkäyttö	38
3.3.2	Materiaalien kierrätys.....	39
3.3.2.1	Esikäsittely ja SE-laitteiden materiaalisällöt	40
3.3.2.1.1	TV:t ja monitorit	42
3.3.2.1.2	Tietokoneet.....	42
3.3.2.1.3	Pesukoneet ja liedet	43
3.3.2.1.4	Kylmälaitteet.....	43
3.3.2.1.5	Matkapuhelimet	44
3.3.2.2	Erotusprosessit.....	45
3.3.2.2.1	Mekaaniset erotusprosessit	45
3.3.2.2.2	Pyrometallurgiset erotusprosessit	47
3.3.2.2.3	Kuusakoski Oy.....	49
3.3.2.2.4	Noell Abfall und Energietechnik GmbH.....	51
3.3.2.2.5	Boliden Minerals AB.....	52
3.3.3	Loppusijoitus tai polttaminen	53
4	SE-LAITTEISSA ESIINTYVÄT KESKEISIMMÄT MATERIAALIT JA YHDISTEET SEKÄ NIIDEN KIERRÄTYS.....	54
4.1	VAARALLISET AINEET	55
4.1.1	Kadmium.....	55
4.1.2	Lyijy	56
4.1.3	Elohopea.....	56
4.1.4	Kuudenarvoinen kromi.....	57
4.1.5	Bromatut palonestoaineet.....	57
4.2	RAUTA	58
4.3	KUPARI	58
4.4	MUOVIT	59
4.5	LASI.....	61
4.6	JALOMETALLIT	62
5	CASE: MATKAPUHELIMEN MATERIAALIT JA KIERRÄTYS	63
5.1	MATKAPUHELIMEN MATERIAALISÄLLÖN MUUTTAMISEN VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖÖN KOKO ELINKAAREN AIKANA	66
5.1.1	Elinkaaren aikana tapahtuvat ympäristövaikutukset	67
5.1.1.1	Valmistus- ja suunnittelunäkökohdat.....	68
5.1.1.2	Käytönaikaiset näkökohdat.....	69

5.1.1.3	Käytönjälkeiset näkökohdat	70
5.1.1.4	Matkapuhelimen käytönjälkeiset materiaa livirrat.....	71
5.1.2	Lainsäädännölliset näkökohdat	73
6	YHTEENVETO	75
7	LÄHDELUETTELO	79

LYHENNELUETTELO

ABS	Akryylnitriilibutadieeni-styreeni
BAT	Paras mahdollinen käytössä oleva teknologia
CFC	Freoni, runsaasti klooria sisältävä halogeenihiilivety
ECS	Eddy current –menetelmään perustuva erotin
HCFC	Freoni, vähän klooria sisältävä halogeenihiilivety
PBB	Polybromibifenyylimuokattu
PBDD	Polybromidibentsodioksiini
PBDE	Polybromidifenyyleetteri
PBDF	Polybromidibentsofuraani
PC	Polykarbonaatti
PCB	Polykloorattu bifenyylimuokattu
PP	Polypropeeni
PS	Polystyreeni
PU	Polyuretaani
PVC	Polyvinyylikloridi
ROHS	Restriction on Hazardous Substances (= vaarallisten aineiden käytön rajoittaminen)
SE-laite	Sähkö- tai elektroniikkalaite
SER	Sähkö- ja elektroniikkaromu
WEEE	Waste from Electric and Electronic Equipment (= SER)

1 JOHDANTO

Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätys on tulossa pakolliseksi kaikissa EU-maissa. Keväällä 2002 EU:n parlamentti hyväksyi kaksi direktiiviä asian tiimoilta ja direktiivit astunevat voimaan vuoden 2002 aikana. Direktiivien tärkeimmät kohdat ovat tuottajan vastuu kierrätyksen rahoittamisessa, tiettyjen vaarallisten aineiden kieltäminen valmistuksessa sekä keräyksen ja esikäsittelyn järjestäminen. Lainsäädännön valvonta on jäsenvaltioilla.

Uusi lainsäädäntö vaikuttaa voimakkaasti sähkö- ja elektroniikkalaitteiden tuottajiin, jotka joutuvat kustantamaan kierrätyksen. Näin ollen helposti kierrätettävä ja ympäristöystävällinen tuote olisi tuottajalle edullinen tapa selvitä vastuustaan. Tuottajien toivotaankin direktiivin vaikutuksesta keskittyvän tuotesuunnitteluun ja sitä kautta tehokkaampaan ja helpompaan kierrätykseen.

Kappaleessa 2 tarkastellaan kahta EU:n direktiiviä ja niihin liittyviä perusteluja:

- WEEE-direktiivi, Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta sekä
- RoHS-direktiivi, Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa.

Kappaleessa 3 tarkastellaan sähkö- ja elektroniikkatuotteiden elinkaarta ja tuotteiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Elinkaarianalyysi on erinomainen apuväline ympäristövaikutusten analysointiin. Elinkaarianalyysissä keskitytään tuotesuunnitteluun, keräysjärjestelmiin ja kierrätykseen. Tuotesuunnittelussa pohditaan, miten tuote tulisi suunnitella mahdollisimman vähän ympäristöä kuormittavaksi. Keräysjärjestelmien tarkastelussa arvioidaan keräysjärjestelmien toimivuutta niin ympäristön kuin taloudellisuuden kannalta. Kierrätyksessä arvioidaan esikäsittelyä ja erotusprosesseja.

Kappaleessa 4 tarkastellaan sähkö- ja elektroniikkalaitteissa esiintyvien materiaalien ominaisuuksia niin käytön kuin kierrätyksen kannalta. Tässä kappaleessa käsitellään myös ROHS-direktiivissä mainitut kielletyt aineet.

Kappaleessa 5 arvioidaan, miten muovin korvaaminen metallilla vaikuttaisi matkapuhelimen aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin koko elinkaaren aikana. Lisäksi tarkastellaan asiaa myös lainsäädännöllisestä näkökulmasta.

2 LAINSÄÄDÄNTÖ

2.1 TAUSTAA

EU:n komissio aloitti vuonna 1998 sähkö- ja elektroniikkaromun (SER) jätehuollon järjestämistä sääntelevän direktiivin (Directive of Waste from Electric and Electronic Equipment, WEEE) valmistelun. Vuonna 2000 direktiivi jaettiin kahteen osaan ja edellä mainitun lisäksi esiteltiin direktiiviehdotus tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa. (Restriction on Hazardous Substances, ROHS). Direktiivien tarkoituksena on pyrkimys vähentää käytöstä poistuvien sähkö- ja elektroniikkalaitteiden (SE-laitteiden) ympäristövaikutuksia. Direktiiviehdotukset on hyväksytty Euroopan Unionissa ja tulevat voimaan jäsenvaltioissa vuoden 2002 aikana.

2.2 PERUSTELUT

2.2.1 Tuottajan vastuuta koskeva periaate

Direktiivien keskeinen sisältö koskee tuottajan vastuuta, millä tarkoitetaan sitä, että SE-laitteiden valmistajat ja maahantuoja asetetaan fyysiseen ja taloudelliseen vastuuseen laitteiden jätehuollosta. Käytännössä näiden yritysten tulee huolehtia käytöstä poistettujen laitteiden keräys ja käsittely joko itse tai alihankintana. Perimmäisenä tarkoituksena on siis kannustaa valmistajia ottamaan ympäristönäkökohdat huomioon jo tuotesuunnitteluvaiheessa.

Tuottajavastuu perustuu siihen, että tuottajilla on paras mahdollisuus vaikuttaa tuotteiden kierrätettävyyteen; paitsi tuotesuunnittelussa valmistajat voivat vaikuttaa myös siihen, että kierrätys toteutetaan kustannustehokkaasti. Kolmanneksi valmistajilla on mahdollisuus lisätä tuotteen hintaan ympäristövaikutuksista aiheutuva kustannusrasitus, esim. kierrätysmaksu.

Tällä hetkellä ei ole olemassa taloudellisia houkuttimia sen varmistamiseksi, että tuottaja ottaisi jätehuollon huomioon tuotteen suunnitteluvaiheessa. Ongelmaksi on muodostunut myös se, miten rahoitetaan ns. ”historiallisen romun” sekä ”vapaamatkustajien” laitteiden käsittely. Historiallisella romulla tarkoitetaan niitä myöhemmin käytöstä poistuvia SE-laitteita, jotka ovat tulleet markkinoille ennen direktiivin voimaantuloa. Vapaamatkustajat ovat niitä tuottajia tai maahantuojia, jotka pyrkivät välttämään oman tuottajavastuunsa. Yhtenä vaihtoehtona pidetään sitä, että tuodessaan tuotteen markkinoille tuottaja velvoitetaan toimittamaan takuu tuotteen kierrätyksen rahoituksesta.

2.2.2 SER:n määrän lisääntyminen

SE-laitteiden tuotanto on yksi nopeimmin kasvavista teollisuuden aloista länsimaissa. Sekä tekniset innovaatiot että markkinoiden laajentuminen kiihdyttävät laitteiden vaihtoa. Esimerkiksi Suomessa SE-teollisuuden tuotanto on kasvanut vuodesta 1992 keskimäärin 24% vuodessa (Tilastokeskus).

SER:n määrä on lisääntynyt viime aikoina monesta eri syystä:

- elektroniikkalaitteet ovat viime aikoina yleistyneet niin teollisuudessa kuin myös kuluttajien käytössä,
- tuotteiden elinikä on lyhentynyt sekä
- alhainen kierrätysaste.

2.2.3 SER:n huollon nykytilanne

EU-komission raportti ”Priority Waste Streams” arvioi ympäristövaikutuksista seuraavaa:

- vuonna 1998 EU:n alueella syntyi elektroniikkaromua 6 miljoonaa tonnia (4% yhdyskuntajätteestä),
- elektroniikkaromun määrä lisääntyy vuodessa n. 3-5 % (jätteiden määrä kaksinkertaistuu 12 vuodessa) sekä

- tällä hetkellä jopa 90 % SER:sta viedään suoraan kaatopaikalle tai poltetaan ilman esikäsitteilyä.

Nykytilanteen suurimpia haasteita SER:n kierrätyksessä ovat:

- SER:n kierrätys on suhteellisen uutta teollisuutta,
- kaatopaikkojen rajallinen kapasiteetti,
- kierrätetyn materiaalin alhainen kysyntä,
- puutteelliset keräysjärjestelmät sekä
- riittämättömät investoinnit tutkimukseen ja kehitykseen.

2.2.3.1 SER:n polttaminen

Jätteen polton tarkoituksena on tuhota myrkylliset tai haitalliset aineet ja ottaa talteen jätteen sisältämä energia. Jätteen poltossa syntyy palamisjätteitä kuonana, lentotuhkana, savukaasujen puhdistustuotteina ja puhdistettuina savukaasuina. SER:n polttamisen kannalta keskeisin materiaali on muovi, jota on SER:ssa n. 20%.

Jätteenpolto ilman esikäsitteilyä aiheuttaa mm. elohopea- ja kadmiumpäästöjä. Erityisen vaarallista on polttaa bromattuja palonestoaineita alhaisissa lämpötiloissa, koska tällöin syntyy erittäin myrkyllisiä polybromidibentsodioksiini- ja polybromidibentsofuraaniyhdisteitä (PBDD ja PBDF). SER sisältää myös runsaasti polyvinyylikloridimuovia (PVC), joka ei sovellu poltettavaksi, koska poltossa syntyy kloorattuja hiilivetyjä. Epätäydellisessä palamisessa muovien palamistuotteena syntyy myös hiilimonoksidia ja dioksiineja.

Ilman esikäsitteilyä polttaminen aiheuttaa usein myös huomattavia energiahäviöitä. Esimerkiksi lasin syöttö polttoprosessiin aiheuttaa n. 400 kJ:n energiahäviön/kg /3/.

SE-laitteiden polttaminen lisää kuonan, poistokaasun ja suodatuskakun metallipitoisuutta, myös raskasmetallipitoisuutta. Poltossa syntyvää tuhkaa käytetään usein esimerkiksi täyttömateriaalina tienrakennusalueilla. Siksi tuhka ei saisi sisältää liikaa

ympäristölle haitallisia aineita. Korkea raskasmetallipitoisuus vaikeuttaa aina kuonan loppusijoitusta. Esikäsittelyprosessi vähentää osaltaan eri metallien pitoisuuksia jäännöksissä.

2.2.3.2 SER:n sijoittaminen kaatopaikoille

SER:n sijoittaminen kaatopaikoille vaikuttaa aina ympäristöön haitallisesti. Vaikutuksia voidaan ehkäistä huomattavasti, jos SER sijoitettaisiin valvotuille kaatopaikoille, joissa noudatetaan ympäristön mahdollisimman pieneen kuormitukseen tähtäävää uutta kaatopaikkadirektiiviä. Nykyään kuitenkin monessa jäsenvaltiossa SER:a säilytetään valvomattomilla kaatopaikoilla. Esimerkiksi Kreikassa valvomattomia kaatopaikkoja on 70% kaikista kaatopaikoista.

Suurimpia ongelmia kaatopaikoille sijoittamisessa aiheuttavat SER:n sisältämien aineiden huuhtoutuminen pohjaveteen sekä hiukkasten vapautuminen ja haihtuminen ilmaan.

Elohopeaa ja polykloorattuja bifenyylä -yhdisteitä (PCB) huuhtoutuu, kun näitä aineita sisältävät laitteet tuhoutuvat. Elohopea on sekä metallimuodossa että sitoutuneena erittäin haihtuva. Lisäksi elohopea sitoutuu erittäin helposti orgaaniseen ainekseen ja kulkeutuu veden mukana maan pintakerroksesta humukseen.

Bromattuja palonestoaineita ja kadmiumia sisältävistä muoveista huuhtoutuu PBDE-yhdisteitä ja kadmiumia. Kadmium on metalleista erittäin liukoinen. SER:n sisältämä metallinen elohopea ja dimetyylielohopea haihtuvat ilmaan.

Orgaaninen aines, kuten muovi, hajoaa kaatopaikalla vähitellen. Muovien hajoamiseen saattaa kulua pitkiäkin aikoja ja lopulta muovien hajotessa myös niiden sisältämät lisäaineet, kuten metalliset stabilisaattorit ja pehmentimet, vapautuvat.

Vaikeasti hallittavat tulipalot kaatopaikoilla aiheuttavat metallien ja muiden kemikaalien (dioksiini, furaani) haihtumisen ilmaan bromattujen palonestoaineiden kuumentuessa.

2.2.3.3 *SER:n kierrätys*

Yksi direktiivien päätavoitteista on lisätä SER:n kierrätystä. Yleisesti ottaen kierrätyksen lisääminen säästää resursseja ja pienentää käsittelykapasiteetin, kuten kaatopaikkojen, tarvetta. Täytyy kuitenkin muistaa, että jätteiden hyödyntämisprosessi voi myös lisätä ympäristön pilaantumista, jos jätettä ei esikäsitellä asianmukaisesti.

Palonestoaineita sisältävien muovien kierrätys on erittäin hankalaa, koska näitä muoveja ei merkitä asianmukaisesti ja sen vuoksi niitä on vaikea erottaa tavallisesta muovista. Useimmat kierrättäjät eivät tämän vuoksi käsittele minkäänlaista SER:n sisältämää muovia. Kuitenkin esimerkiksi Apple on jo aloittanut käyttämiensä muoviosien standardisoinnin [24]. Tämä helpottaa huomattavasti muovien jälkikäsittelyä.

Raskasmetalleja, kuten lyijyä ja kadmiumia, sisältävän SER:n kierrätyksessä vapautuu ilmaan vaarallisia päästöjä. Päästöjä voitaisiin vähentää korvaamalla uusissa SE-laitteissa kyseiset materiaalit vähemmän haitallisilla aineilla ja asianmukaisella SER:n esikäsittelyllä.

Raskasmetallit ja halogenoidut aineet aiheuttavat ongelmia myös murskauksessa. Jos SER murskataan purkamatta, vaaralliset aineet voivat levitä hyödynnettävään materiaaliin ja murskausjätteeseen.

2.2.4 **Kansalliset lainsäädännöt**

SER:n huoltoon liittyvien ympäristöongelmien vuoksi jäsenvaltiot ovat alkaneet laatia omia kansallisia lainsäädäntöjään. Mm. Alankomaissa, Tanskassa, Ruotsissa, Itävallassa, Belgiassa ja Italiassa on jo annettu alan lainsäädäntöä. Erilaisten lainsäädäntöjen on katsottu johtavan mm. seuraavanlaisiin ongelmiin:

- kansalliset erot SER:n jätehuoltopolitiikassa voivat haitata kansallisten järjestelmien tehokkuutta, koska romua voidaan ohjata edullisempiin kierrätysjärjestelmiin maan ulkopuolelle,
- kansalliset erot tuottajavastuuperiaatteessa johtavat siihen, että taloudellinen vastuu jakautuu toimijoille eri maissa eri tavalla,
- kansalliset erot haitallisiin aineisiin liittyvissä vaatimuksissa, kuten jonkin materiaalin käytön kieltäminen, aiheuttavat teknisiä kaupan esteitä SE-laitteille sekä
- toisistaan poikkeavat kierrätysjärjestelmät aiheuttavat erityisesti kansainvälisesti toimiville yrityksille kalliita ratkaisuja ja kohtuutonta hallinnointia.

Jäsenvaltiot pitivät komission direktiivialoitetta tervetulleena.

Alankomaissa tuli 1. kesäkuuta 2001 voimaan asetus, jonka mukaan kuluttajat voivat palauttaa SER:n maksutta tuotteen toimittajalle tai paikalliselle viranomaiselle. Valmistajien ja maahantuojien vastuulla on tämän jälkeen tuotteiden käsittely. Erikseen kerätyn SER:n sijoittaminen kaatopaikalle ja polttaminen on kiellettyä.

Ruotsissa tuli 1. heinäkuuta 2001 voimaan asetus, jonka mukaan kuluttajat voivat palauttaa SER:n vähittäismyyjille tai kunnallisiin keräyspisteisiin. Kierrätyskustannukset ovat kunnan ja valmistajan vastuulla. SER:a ei saa sijoittaa kaatopaikalle, polttaa tai murskata ilman esikäsittelyä.

2.2.5 Vaaralliset aineet

Direktiiveissä vaaditaan SE-laitteissa tiettyjen vaarallisten aineiden, kuten lyijyn, elohopean, kadmiumin, kuudenarvoisen kromin, polybromibifenyylin (PBB) ja polybromidifenyylietterin (PBDE) käytön rajoittamista. Tämänhetkisessä SER:n huollossa terveys- ja ympäristöongelmia voitaisiin vähentää ohjaamalla kyseinen jäte muualle kuin polttolaitoksiin tai kaatopaikoille. Toteuttamiseen vaadittaisiin erilliset keräys-, esikäsittely- ja hyödyntämisjärjestelmät. Tämä ei kuitenkaan poista ongelmaa,

koska myös keräyksessä ja hyödyntämisessä aiheutuu vaaraa terveydelle ja ympäristölle. Tehokkain tapa varmistaa ympäristöriskien väheneminen on korvata vaaralliset aineet muilla aineilla.

Vaikka SER kerätään erikseen ja poistetaan vaaralliset aineet ja käsitellään ne erikseen, on keräystavoite – 25 % – kuitenkin niin alhainen, että tällä keräysmäärällä ei saavuteta tarpeeksi tehokkaita tuloksia ympäristöriskien kannalta.

Vaarallisten aineiden käytön kieltämisellä kokonaan saattaa olla myös ympäristön kannalta negatiivisia vaikutuksia. Esim. lyijy eristää erittäin hyvin säteilyä ja elohopea on erittäin energiatehokas. Säteilyn ja energiankäytön lisääntyminen ovat esimerkkejä haitoista, joita vaarallisten aineiden käytön lopettaminen voi aiheuttaa. Toisaalta korvaavien ratkaisujen ympäristövaikutuksia ei välttämättä tunneta riittävän tarkasti /26/. Tarkasteltaessa esim. juotteita elinkaarianalyysin avulla, voidaan pohtia, aiheuttavatko vaihtoehtoiset ratkaisut jopa enemmän ympäristökuormitusta johtuen korvaavien materiaalien tuotannosta sekä itse juottamistapahtumasta; hopean tuottaminen aiheuttaa enemmän ympäristörasitusta kuin lyijyn ja itse juottamisessa joudutaan käyttämään korkeampia lämpötiloja, mikä rasittaa ympäristöä myös enemmän /40/.

Esimerkiksi piirilevyjen kohdalla uusien materiaalien käyttö lyijyn tilalla saattaa vaikeuttaa kierrätysprosessia. Tämä taas saattaa johtaa näiden aineiden kaatopaikkaukseen ja sitä myöten kierrätyksen vähenemiseen. Lyijyn käytön kieltämisen onkin katsottu olevan hyvä asia kaatopaikkojen kannalta, mutta ei välttämättä kierrätyksen kannalta /23/. Elohopean käytön korvaaminen esimerkiksi kannettavissa tietokoneissa taas tekee laitteista kalliimpia ja vähemmän energiatehokkaita /25/.

Teollisuuden edustajat pitävät tiettyjen aineiden käytön lopettamista koskevaa vaatimusta epäasianmukaisena, mutta käytön minimointi hyväksytään yleisesti. Esimerkiksi Panasonic ja Sony käyttävät jo lyijyvapaita juotteita joissakin tuotteissaan ja HP on lopettanut elohopean käytön uusissa tulostimissa /24/.

2.2.6 Taloudellinen arviointi

Vaikka ympäristöasiat ovat erittäin tärkeitä, täytyy muistaa, että mikään yritys ei yleensä harjoita liiketoimintaa tappiolla. Kun pohditaan SER:n kierrätystä, tulee koko ajan taustalla olla mielessä toiminnan taloudellisuus. Jotta kierrätys olisi kannattavaa, pitää raaka-ainetta olla tarpeeksi saatavilla, tuotteiden olla helposti kierrätettäviä sekä prosessien olla tehokkaita. Näin päästään siihen, että sekundäärinen raaka-aine on primääristä halvempaa. Näin kierrätetylle materiaalille saadaan luotua markkinoita ja kysynnän kasvua /26/.

2.2.6.1 Toteuttamiskustannukset

EU:n jäsenmaissa eri kokeiluhankkeista ja raporteista saatujen tietojen perusteella kotitalouksissa syntyvän SER:n keräys- ja kierrätystavoitteiden saavuttamisen kokonaisnettokustannukset (keräys- ja kierrätyskustannukset miinus uusiomateriaalin myyntitulot) ovat 500-900 miljoonaa euroa/vuosi EU:n 15 jäsenvaltiossa. Oletuksina on käytetty keräystavoitetta 4 kg/asukas/vuosi. Jäsenvaltioiden asukasluku on n. 375 miljoonaa, jolloin yhden asukkaan 4 kg tulisi maksamaan n. 1,30-2,4 euroa. Ammattikäytössä olevat laitteet lisäävät kustannuksiin n. 20%. Lisäksi EU:n komissio on arvioinut erilaisten suhdetoiminta- ja konsulttikustannusten olevan n. 100 miljoonaa euroa ensimmäisenä vuonna ja laskien ajan myötä. Jos kaikki kustannukset siirrettäisiin kuluttajien maksettavaksi sisällyttämällä ne tuotteen hintaan, SE-laitteiden hinnat nousisivat tuoteryhmästä riippuen 1-3%.

Vaikuttaako hinnanmuutos mahdollisesti kuluttajien ostokäyttäytymiseen ja sitä kautta tuotteiden myyntiin? Konsulttiyritys KPMG:n tekemän tutkimuksen mukaan suurten kodinkoneiden ja kuluttajaelektroniikkatuotteiden kysyntää voidaan pitää joustamattomana, jos hinnanmuutos on 1-3%. Tällöin hinnanmuutos ei vaikuta myyntiin pitkällä aikavälillä. Pienten kuluttajaelektroniikkalaitteiden kysyntä on osittain joustavaa, jos hinnanmuutos on 1%. Tällöin myynnin odotetaan vähenevän 1-2%.

Keräyskustannusten EU:n komissio on arvioinut kokeiluhankkeiden perusteella olevan n. 300-600 miljoonaa euroa vuodessa. Arvio perustuu siihen, että asetettu 4 kg/asukas SER:a saadaan kerättyä. Tonnille tulee tällöin hintaa 200-400 euroa. Kyseiselle neljälle kilogrammalle tulisi hintaa tällöin 0,8-1,6 euroa. Keräyskustannusten odotetaan laskevan ajan myötä, kun perusinvestoinnit on tehty, logistiikka optimoitu ja kuluttajien tietoisuus parantunut.

Kierrätyskustannukset vaihtelevat huomattavasti tuoteryhmästä riippuen. Edelleen kokeiluhankkeissa on todettu suurien kodinkoneiden kierrätyskustannuksiksi 10-80 euroa/tonni, jääkaappien 200-300 euroa/tonni, näytön sisältävien laitteiden 100-800 euroa/tonni ja pienten kodinkoneiden 200-500 euroa/tonni. Oletetaan, että SER sisältää em. tuoteryhmistä 70% suuria kodinkoneita (sis. jääkaapit), 15 % näytön sisältäviä laitteita ja 15 % pieniä kodinkoneita. Tällöin huomioimalla em. kustannukset saadaan kierrätyskustannuksiksi n. 200-300 miljoonaa euroa vuodessa.

Vaarallisten aineiden korvaaminen muilla aineilla aiheuttaa tuottajille myös lisäkustannuksia. Tosin jo nyt muutamat valmistajat ovat luopuneet lyijyn, elohopean, kadmiumin, kuudenarvoisen kromin ja halogenoitujen palonestoaineiden käytöstä. Suurin kustannus teollisuuden mukaan tulee olemaan lyijyn korvaaminen juotoksissa. Komissio on arvioinut tinapohjaisten juotosten käytön lisäävän käyttökustannuksia n. 150 miljoonaa euroa vuodessa. Tämän päälle tulisivat investointikustannukset. Toisaalta myös laitteiden myyntivolyymit ovat sen verran suuria, että useimpien tuotteiden hintaan korvaamisella olisi minimaalinen vaikutus.

2.2.6.2 Direktiiveillä saavutettavat hyödyt

Taloudellisia hyötyjä SER:n uudelleenkäytöllä ja kierrätyksellä saavutetaan

- korvaamalla kierrätetyllä materiaalilla käyttämättömän materiaalin tuotanto-kustannukset,
- jätteiden käsittelykulujen pienenemisellä, jolloin kustannussäästöä syntyy mm. kaatopaikkatilan säästymisenä,

- kustannusten pienenemisellä tulevaisuudessa johtuen paremmasta tuotesuunnittelusta,
- energiansäästöllä (SER:n kierrätyksen on arvioitu säästävän vuodessa EU:n alueella 120 miljoonaa gigajoulea johtuen neitseellisen materiaalin vähentyneestä tuotantotarpeesta sekä SER:n hyödyntäminen energiana, esim. muovien polttaminen) sekä
- ympäristökustannusten sisällyttämisellä suoraan tuotteen hintaan. (yhteiskunta ei enää joudu huolehtimaan puhdistuksesta tai ympäristön pilaantumisesta aiheutuvista kustannuksista).

2.3 WEEE-DIREKTIIVI

Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta.

2.3.1 Tavoitteet (1. artikla)

Direktiivien keskeisimmät tavoitteet ovat /3/:

- kansallisten lainsäädäntöjen yhtenäistäminen,
- SER:n ennaltaehkäisy ja vähentäminen,
- SER:n uusiokäytön, talteenoton ja kierrätyksen edistäminen sekä
- SER:n käsittelyyn ja hävittämiseen liittyvien ympäristöriskien minimoiminen

2.3.2 Soveltamisala (2. artikla)

Direktiivejä sovelletaan SE-laitteisiin, jotka kuuluvat seuraaviin tuoteryhmiin /3/:

1. suuret kodinkoneet (jääkaapit, pesukoneet, liedet),
2. pienet kodinkoneet (pölynimurit, silitysraudat, kahvinkeitin, kellot),
3. tieto- ja teletekniset laitteet (tietokoneet, tulostimet, puhelimet),
4. kuluttajaelektroniikka (radiot, televisiot, videonauhurit),
5. valaistustekniikka (valaisimet, loisteputket),
6. sähkö- ja elektroniikkatyökalut (porat, sahat, ompelukoneet),
7. lelut, vapaa-ajan laitteet ja urheilulaitteet (videopelit),

8. lääkinnälliset laitteet (hengityskoneet, analysaattorit, sädehoitolaitteet),
9. tarkkailu- ja valvontalaitteet (paloilmaisimet, termostaatit) sekä
10. automaattit (juoma-automaattit).

2.3.3 Määritelmät (3. artikla)

Tuoteryhmien lisäksi on määritelty seuraavat keskeiset termit /3/:

- *Sähkö- ja elektroniikkalaite (SE-laite)* on laite, jonka toiminta on riippuvainen sähkövirrasta tai elektromagneettisesta kentästä tai joka on tarkoitettu näiden tuottamiseen, siirtämiseen tai mittaamiseen ja joka on suunniteltu toimimaan 1000 V vaihtojännitteellä tai 1500 V tasajännitteellä.
- *Ennaltaehkäisy* tarkoittaa toimenpiteitä, joilla pyritään vähentämään SER:n sekä niiden sisältämien materiaalien ja aineiden määrää ja negatiivisia ympäristövaikutuksia.
- *Uudelleenkäytöllä* tarkoitetaan tuotteiden tai niiden komponenttien käyttämistä siihen tarkoitukseen, johon ne on alunperin valmistettu.
- *Kierrätyksellä* tarkoitetaan jättemateriaalin käyttöä tuotantoprosessissa alkuperäiseen tarkoitukseensa tai muuhun tarkoitukseen.
- *Loppusijoitus* tarkoittaa jätteen loppusijoitusta kaatopaikalle.
- *Energian hyödyntämisellä* tarkoitetaan jätteen polttoa yksin tai yhdessä muun jätteen kanssa tarkoituksena tuottaa energiaa ottamalla polttoprosessin lämpö talteen.
- *Tuottaja* on SE-laitteen valmistaja tai ammattimainen maahantuoja, joka tuo laitteita EU:n jäsenvaltioihin. Erillisten komponenttien tai osien valmistaja ei ole näiden direktiivien tarkoittama tuottaja.

2.3.4 Toimenpiteet kierrätyksen parantamiseksi

Direktiiveissä mainitaan useita kierrätystä parantavia toimenpiteitä, pääasiassa tuotesuunnitteluun liittyviä /1/:

- vaarallisten aineiden käytön minimointi,
- erilaisten muoviyhdisteiden lukumäärän minimointi,

- kierrätettävien materiaalien käytön lisäämiseen kannustaminen,
- SE-laitteiden tuotesuunnittelun ja valmistuksen edistäminen siihen suuntaan, että niiden korjaaminen, uusiokäyttö, purkaminen ja kierrätys olisi helpompaa sekä
- lyijyn, elohopean, kadmiumin, kuusiarvoisen kromin ja halogenoitujen palonestoaineiden (PBB ja PBDE) käytöstä poistaminen.

2.3.5 Erillinen keräys (4. artikla)

Yksi keskeisimpiä ja tärkeimpiä alueita direktiivien toimeenpanossa on kotitalouksista palautuvan romun keräysverkoston rakentaminen. Kotitalouksista palautuvan romun keräyksen toteuttamiselle on direktiiveissä asetettu seuraavia vaatimuksia /3/. Jäsenvaltioiden on varmistettava, että

- perustetaan keräilyjärjestelmä, jotta loppukäyttäjä ja jälleenmyyjä voivat palauttaa kotitalouksien SER:n maksutta,
- keräyspisteitä on käytettävissä riittävästi väestötiheyteen nähden,
- toimittaessaan uuden tuotteen jälleenmyyjät tarjoutuvat ottamaan kotitalouksilta takaisin maksutta samanlaisen SE-laitteen sekä
- tuottajat voivat perustaa palautusjärjestelmiä myös kotitalouksista palautuvalle romulle.

Jäsenvaltioiden on myös varmistettava, että tuottajat huolehtivat muiden käyttäjien kuin kotitalouksien SER:n keräyksestä. Käytännössä tämä toteutetaan siten, että SER:n keräys, esikäsittely, hyödyntäminen sekä käsittely sisältyy sopimuksiin, jotka tehdään laitteen tuottajan ja käyttäjän välillä oston yhteydessä.

Kotitalouksista on tavoitteena 31.12.2005 mennessä kerätä 6 kg/hlö SER:a vuodessa, mikä on erilliselle keräykselle asetettu vähimmäistavoite.

2.3.6 Esikäsittely (5. artikla)

Jäsenvaltioiden on varmistettava, että tuottajat perustavat järjestelmiä SER:n esikäsittelyä varten. Ensisijaisena tavoitteena on laitteiden uusiokäyttö sekä materiaalisäällön

uusioraaka-aineen hyödyntäminen. Lopusta materiaalista pyritään hyödyntämään sen energiasisältö. Muovista 5 % tulisi kierrättää. Kaatopaikkasijoitusta tulisi välttää.

Esikäsittelyn on direktiivien mukaan sisällettävä ainakin nesteiden poisto sekä ROHS-direktiivissä mainittujen materiaalien ja komponenttien poisto. Lisäksi esikäsittelyssä on poistettava minimivaatimuksena ainakin seuraavat aineet, valmisteet ja komponentit /3/:

- polykloorattuja bifenylejä (PCB) sisältävät kondensaattorit,
- elohopea ja elohopeaa sisältävät komponentit,
- paristot,
- painetut piirilevyt,
- väriasetit, nestemäiset ja tahnamaiset sekä värilliset väriaineet,
- bromattuja palonestoaineita sisältävät muovit,
- asbestijätteet,
- katodisädeputket (fluoresoiva pinnoite on poistettava),
- kaasut, jotka heikentävät otsonikerrosta (esim. CFC ja HCFC),
- kaasupurkauslamput (elohopea on poistettava) sekä
- yli 100cm² nestekidenäytöt

Esikäsittelyä harjoittavien laitosten ja yritysten tulee suorittaa SER:n esikäsittely direktiivissä määriteltyjen teknisten vaatimusten mukaisesti ja hankkia lupa viranomaisilta. Esikäsittelijän tulee /3/:

- täyttää käsittelyn minimivaatimukset,
- omata edellytykset kierrätystavoitteiden saavuttamiseen (70-90% materiaalista uusioraaka-ainekäyttöön),
- järjestää kuivat tilat laitteiden säilytykseen (läpäisemättömät pinnat, säänkestävä peite),
- järjestää asianmukaiset punnituslaitteet, kuivaa varastotilaa uudelleenkäytettäville osille ja säiliöt paristoille ja haitallisille aineille,
- järjestää laitteisto veden, myös sadeveden, käsittelyyn sekä

- tilastoida käsittelemänsä laitteet ja raportoitava siitä, kuinka tekniset vaatimukset on täytetty.

2.3.7 Hyödyntäminen (6. artikla)

SER:n hyödyntäminen liittyy keskeisesti direktiiveissä asetettuihin kierrätystavoitteisiin. Jäsenvaltioiden tulisi kansallisella lainsäädännöllä kannustaa tuottajia kierrätysmyötäiseen tuotesuunnitteluun sekä lisäämään kierrätetyn materiaalin osuutta SE-laitteiden valmistuksessa. Tuottajien tulee perustaa järjestelmiä, jotka varmistavat kerätyille laitteille asetetut kierrätys- ja muut hyödyntämistavoitteet.

Direktiiveissä on määritelty kierrätystavoitteet kullekin tuoteryhmälle. Kierrätystavoite ilmoitetaan hyödynnettävien materiaalien prosenttiosuutena laitteen painosta. Lisäksi direktiiveissä on määritelty tavoitteet, kuinka paljon tuotteessa tulisi olla kierrätettyjä materiaaleja, aineita ja komponentteja (taulukko 1).

Taulukko 1. Eri tuoteryhmille asetetut kierrätystavoitteet sekä kierrätettyjen materiaalien, aineiden ja komponenttien osuus tuotteessa vuoteen 2004 mennessä /3/.

<i>Tuoteryhmä</i>	<i>Hyödynnettävien materiaalien osuus % laitteen painosta</i>	<i>Kierrätettävien materiaalien osuus % laitteen painosta</i>
Suuret kodinkoneet	90	85
Pienet kodinkoneet	70	60
Tieto- ja teletekniset laitteet	85	70
Kuluttajaelektroniikka	85	70
Kaasupurkauslamput	-	85
Katodisädeputkia sisältävät laitteet	80	75

2.3.8 Rahoitus (7. ja 8. artikla)

Kierrätysjärjestelmän rahoitus on jätetty tuottajien organisoitavaksi. Direktiiveissä annetut yleiset ohjeet kierrätysjärjestelmän rahoittamiseksi ovat /3/:

- jälleenmyyjä ja loppukäyttäjä voivat palauttaa SER:n maksutta,

- tuottajat rahoittavat kotitalouksien SER:n keräyksen, esikäsittelyn, hyödyntämisen ja ympäristöä mahdollisimman vähän kuormittavan käsittelyn sekä
- muiden kuin kotitalouksien SER:n keräys, esikäsittely, hyödyntäminen ja ympäristöä mahdollisimman vähän kuormittavan käsittely sisältyy sopimuksiin, jotka tehdään laitteiden tuottajan ja käyttäjän välillä laitteiden oston yhteydessä.

2.3.9 Tiedotus (9.- 12. artikla)

Direktiivien mukaan SE-laitteiden tuottajilla on myös informaatiovastuu. Tuottajien tulee informoida pääasiassa kotitalouksia, esikäsittelylaitoksia ja viranomaisia. Kotitalouksille suunnattu tiedotus sisältää informaatiota keräysjärjestelmistä ja kuluttajan roolista SER:n uudelleenkäytössä ja kierrätyksessä. Esikäsittelylaitoksille tuottajien tulee toimittaa tietoa SE-laitteiden materiaalisällöstä sekä vaarallisten aineiden sijainnista SE-laitteissa. Viranomaisille tuottajat ilmoittavat markkinoille tulleet laitteet tuoteryhmäkohtaisesti.

Lisäksi kunkin jäsenvaltion on toimitettava vuosittain tietoja komissiolle markkinoille saatettujen, kerättyjen ja kierrätettyjen SE-laitteiden määristä ja ryhmistä. Viranomaiset keräävät tiedot tuottajilta ja kierrätysyrityksiltä. Näin pystytään seuraamaan direktiivien tavoitteiden täyttymistä.

2.4 ROHS-DIREKTIIVI

Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa.

Tämän direktiivin artikkelit ovat tavoitteiltaan, soveltamisalaltaan, määritelmiltään ja voimaantuloltaan samat kuin WEEE-direktiiviehdotuksessa. Ainoa poikkeus direktiivissä on artikla 4, ennaltaehkäisy, mikä on pääsisällöltään seuraavanlainen.

Jäsenvaltioiden on varmistettava, että lyijyn, elohopean, kadmiumin, kuudenarvoisen kromin, polybromibifenyylin (PBB) ja polybromidifenyylietterin (PBDE) käyttö SE-laitteissa korvataan muilla aineilla. Lyijyn, elohopean, kadmiumin ja kuudenarvoisen

kromin käytössä on kuitenkin poikkeustapauksia, joissa näiden aineiden käyttö on sallittua. Tärkeimmät ovat

- elektroniikkakomponenttien ja katodisädeputkien lasin sisältämä lyijy (monitorit ja TV:t),
- lyijy korkeita lämpötiloja kestävässä juotoksissa,
- lyijy seosaineena teräksessä (max 0,3 % lyijyä), alumiinissa (max 0,4% lyijyä) ja kuparissa (max 4% lyijyä) sekä
- kadmium ja kromi korroosionestomenetelmänä.

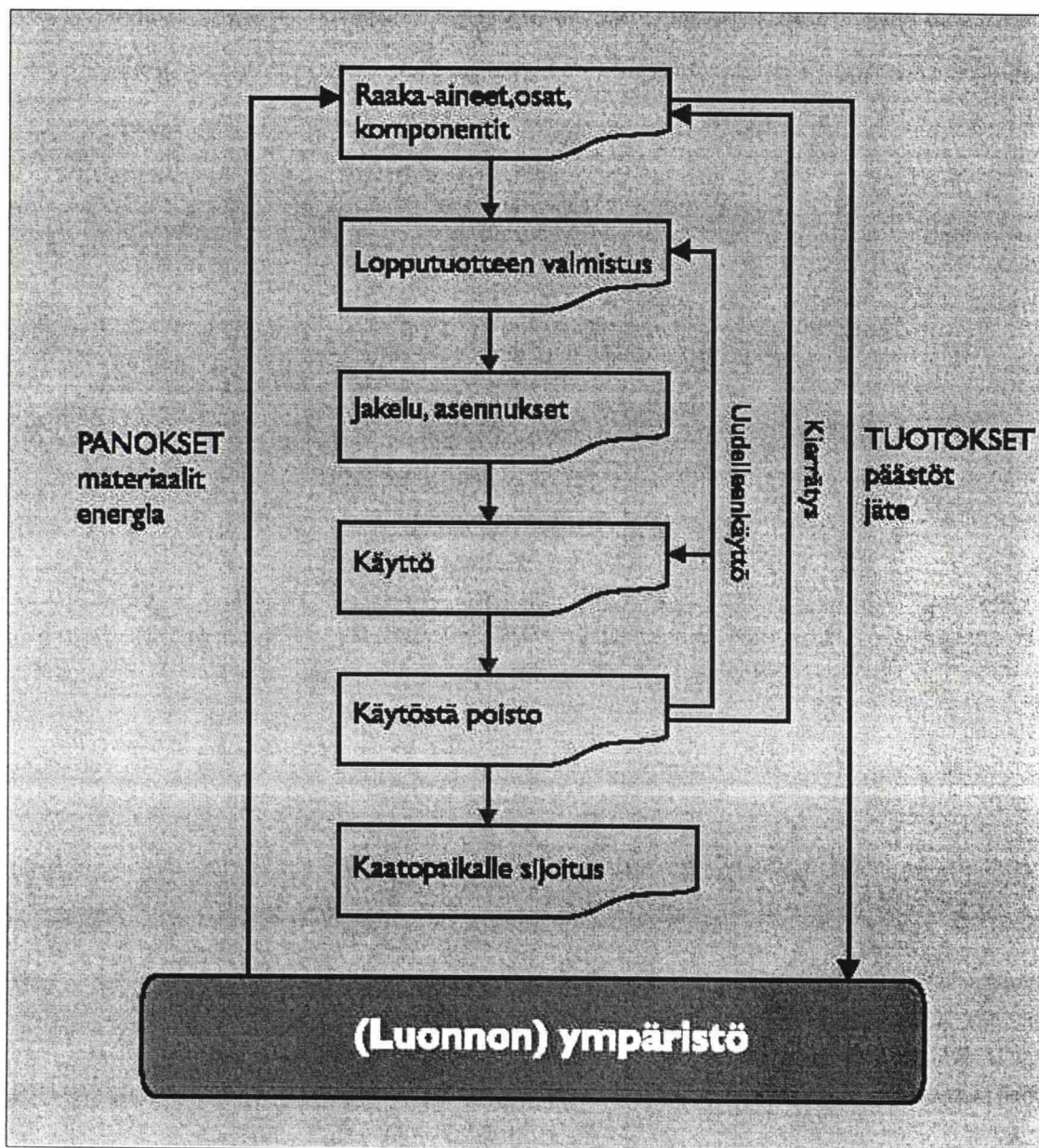
3 ELINKAARIANALYYSI

SE-laitteiden elinkaarianalyysiin voidaan ajatella kuuluvaksi aineiden primäärituotanto, kuljetus, tuotesuunnittelu, valmistus, käyttö, keräysjärjestelmät sekä käytön jälkeiset toiminnot, kuten uudelleenkäyttö, uudelleenvalmistus, kierrätys ja loppusijoitus (Kuva 1) Tuotteen ympäristövaikutuksia tulisi analysoida tarkastelemalla koko elinkaarta, mutta tässä työssä keskitytään tuotesuunnitteluun, keräysjärjestelmiin ja käytön jälkeisiin toimintoihin. Tosin näiden elinkaarivaiheiden vaikutuksia muihin elinkaaren vaiheisiin tarkastellaan.

Tarkasteltaessa elinkaariajattelumallin avulla tuotetta, huomataan, että elektroniikkateollisuudessa ympäristövaikutukset vaihtelevat tuoteryhmittäin suuresti eri elinkaaren vaiheissa. Esimerkiksi televisioilla suurin ympäristökuormitus tulee käytön aikana, kun taas matkapuhelimella elinkaaren vaiheista eniten ympäristöä rasittaa tuotteen valmistus /31/. Jos tarkastellaan kaikkia SE-laitteita, ympäristökuormitus jakautuu seuraavasti elinkaaren eri vaiheisiin /40/:

- tuotantoon liittyvät vaiheet 10-35 %,
- pakkaus ja kuljetus 5-15 %,
- käyttö 50-80 % sekä
- käytön jälkeiset toiminnot 2-5 %.

Kuten sanottu, em. lukemat vaihtelevat tuoteryhmittäin suuresti. Matkapuhelimilla tuotannon osuus on n. 70 % ja käytön 25 %, kun taas televisioilla vastaavat luvut ovat tuotanto 19% ja käyttö 78 % /43/, /44/. Näin ollen televisioiden valmistuksessa kehitystyön tulisi keskittyä käytönaikaisten ympäristövaikutusten tutkimiseen, kun taas matkapuhelimien kohdalla tärkein näkökohta ympäristön kannalta on tuotanto.



Kuva 1. Tuotteen elinkaari ja sen vaiheet /2/.

SER:n jätehuollossa pitäisi pyrkiä noudattamaan kolmea pääperiaatetta, jotka ovat yleisesti käytössä myös muiden teollisuusalojen ympäristöasioissa /1/:

1. *Kestävä kehitys* edellyttää ympäristöasioiden hoitamista siten, ettei tuleville sukupolville siirretä vastuuta nykyisten ongelmien hoidosta (esim. suuret jätevuoret).

2. *Jätteiden vähentämiseen liittyvien toimien priorisoinnilla* halutaan ensisijaisesti estää uuden jätteen syntyminen. Tämän jälkeen ratkaisua etsitään tärkeysjärjestyksessä tuotteiden uusiokäytöstä, materiaalien ja komponenttien uusiokäytöstä, energian hyötykäytöstä ja kaatopaikkahävityksestä.
3. *Tuottajavastuuperiaatteen* mukaan tuottaja on vastuussa koko elinkaaren ajalta tuotteen ympäristövaikutuksista. Erityisesti halutaan painottaa tuotteen käytön jälkeisiä ympäristövaikutuksia, jotka ovat yleisesti olleet yhteiskunnan vastuulla.

Tuottajan tulee näin ollen olla entistä läheisemmässä yhteistyössä esim. alihankkijoidensa kanssa, jotta saataisiin tietoa osien ja komponenttien sisältämistä materiaaleista, kierrätettävyydestä ja valmistustavoista. Tämä johtaa siihen, että myös alihankkijan on kiinnitettävä omiin ympäristökysymyksiinsä entistä enemmän huomiota.

3.1 YMPÄRISTÖMYÖTÄINEN TUOTESUUNNITTELU

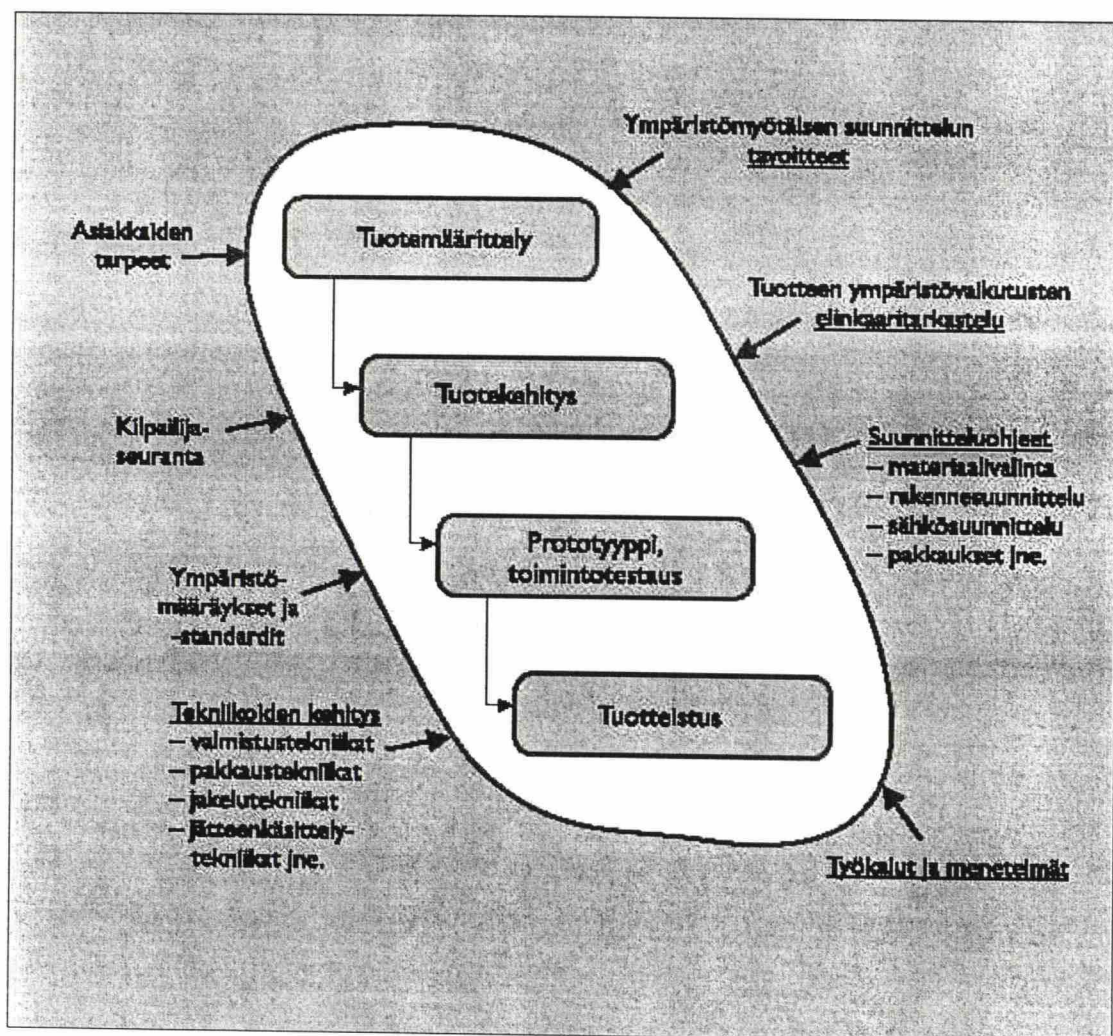
Ympäristömyötäisen tuotesuunnittelun tavoitteena on tunnistaa tuotteen elinkaarensa aikana aiheuttamat merkittävimmät ympäristöhaitat sekä pyrkiä vähentämään niitä tuotesuunnitteluvaiheessa. Myös sähkö- ja elektroniikkateollisuus joutuu panostamaan tuotesuunnitteluun tulevaisuudessa entistä enemmän johtuen globaaleilla markkinoilla toimimisesta, ympäristötietoisista asiakkaista ja kiristyvistä lainsäädännöistä. Lisäksi yritykselle syntyy mahdollisia kustannussäästöjä materiaalien käytön, energian käytön ja jätteen vähentymisestä.

Nykyään kerättävät laitteet ovat niin vanhoja, että niitä ei alunperin ole suunniteltu kierrätettäviksi. Tämän vuoksi materiaaleja, osia ja jopa tuotteita on useinkin vaikea tunnistaa. Pyrittäessä parempaan ympäristömyötäiseen tuotesuunnitteluun tulisi ottaa huomioon monia tekijöitä. Tekniseltä kannalta tärkeimpiä asioita ovat /1/, /13/:

- materiaalien käytön tehostaminen (vähemmän, kevyempiä ja pienempiä materiaaleja, vaikutus kuljetus- ja pakkauskustannuksiin),
- energiankulutuksen minimointi,

- kierrätettävyyden parantaminen ("puhtaiden", kierrätettävien ja kierrätettyjen materiaalien käyttö; materiaalien tunnistuksen helpottaminen purkuvaiheessa; haitallisten aineiden helppo poistaminen; yhteensopivien muovien käyttö; manuaalisen purun helpottaminen),
- ympäristölle ja terveydelle haitallisten aineiden minimointi sekä
- tuotteiden pitkäikäisyyden kehittäminen (luotettavuus, kestävyys, huollon ja korjauksen helppous sekä edullisuus).

Laajemman perspektiivin tuotesuunnittelu sisältää enemmän tekijöitä (Kuva 2).



Kuva 2. Tuotesuunnittelussa huomioon otettavia tekijöitä /2/.

3.2 KERÄYSJÄRJESTELMÄ

Tehokkaan keräysjärjestelmän tarkoituksena on varmistaa se, että mahdollisimman suuri osa käytöstä poistuvista laitteista kerätään talteen. Tämä edellyttää, että laite on helppo palauttaa eikä siitä synny kustannuksia. Yritysten näkökulmasta kierrätysjärjestelmien tulisi olla myös avoimia, jotta niiden toimintaa voidaan järjestelmällisesti seurata sekä mahdollisimman kustannustehokkaita. Keräysjärjestelmä on tärkein osa kierrätysprosessia, koska sen avulla määräytyvät kierrätykseen menevät materiaalivirrat /32/.

Useissa maissa (mm. Itävalta, Hollanti ja Saksa) suoritettut pilottiprojektit sekä jo käytössä olevat järjestelmät ovat tuottaneet kokemuksia SER:n keräyksestä. Näissä tutkimuksissa seuraavat tekijät katsottiin erittäin tärkeiksi hyvän keräystuloksen saavuttamiseksi /16/, /32/:

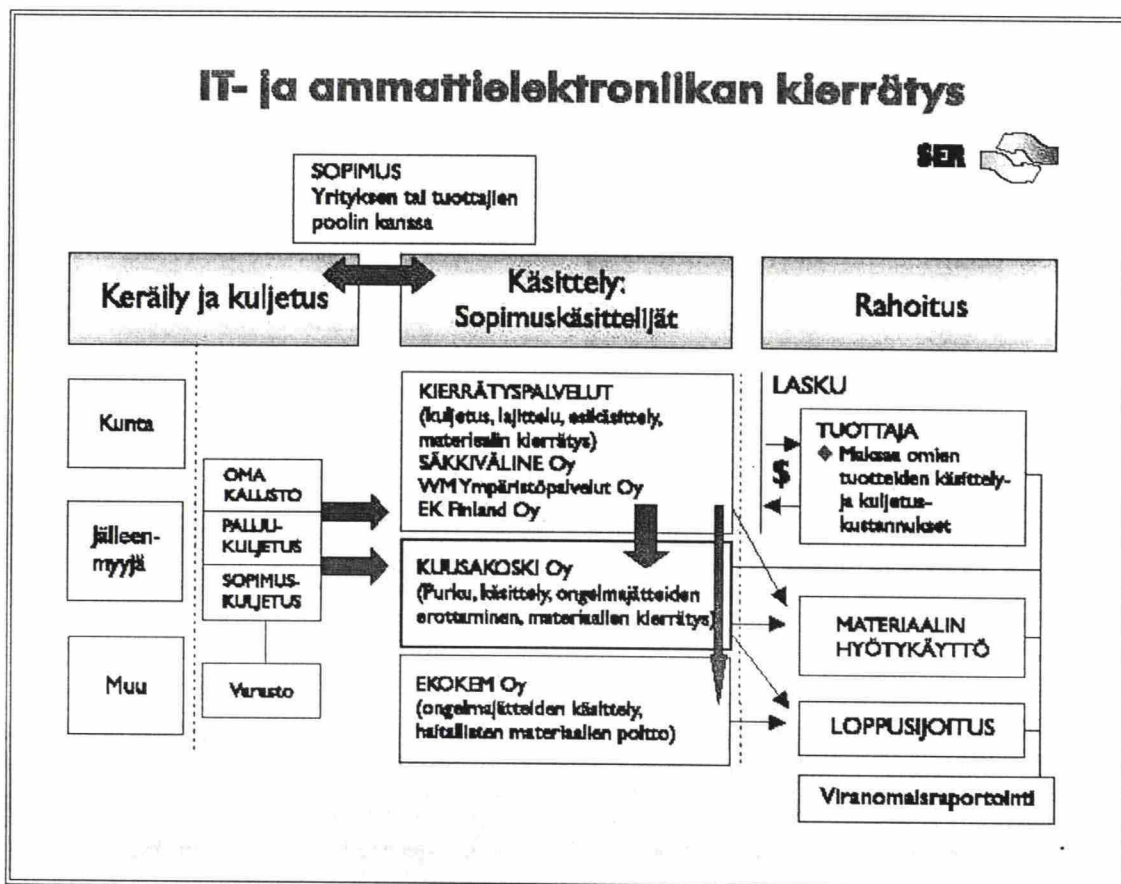
- kuluttajille suunnattu tiedotus,
- pätevät työntekijät,
- viimeiselle käyttäjälle ei aiheudu kustannuksia sekä
- useiden rinnakkaisten kierrätysjärjestelmien olemassaolo.

Tärkeimpänä tekijänä tuottajan kannalta voidaan pitää valintaa kollektiivisen ja tuottajakohtaisen rahoituksen välillä. Jäsenvaltioiden tulisi taata se, että rahoitus tapahtuu tuottajakohtaisesti eli tuottaja on vastuussa vain omista tuotteistaan. Toisaalta myös kollektiivinen rahoitusjärjestelmä on mahdollinen, mikäli kustannukset tuottajakohtaisessa järjestelmässä ovat liian suuret. Tuottajalla on eri mahdollisuuksia toteuttaa ja järjestää SE-laitteiden kierrätys /1/.

3.2.1 Tuottajat ostavat kierrätyspalvelut kollektiivisesti

Tätä keräysjärjestelmää voidaan kutsua todellisiin kustannuksiin perustuvaksi. Järjestelmässä tuottajat maksavat omien laitteidensa todelliset keräily-, kuljetus- ja käsittelykulut. Keräyksen yhteydessä laitteet merkitään merkkikohtaisesti, jotta sopimuskäsittelijä osaa laskuttaa jälkikäteen jokaista tuottajaa todellisilla kustannuksilla. Esimerkkinä tästä järjestelmästä on Alankomaissa käytössä oleva ICT-malli, jonka on

parhaiten katsottu soveltuvan yksittäisten tuoteryhmien kierrätykseen /1/. Kierrätetyn materiaalin keskikustannus on 0,80 €/kg.



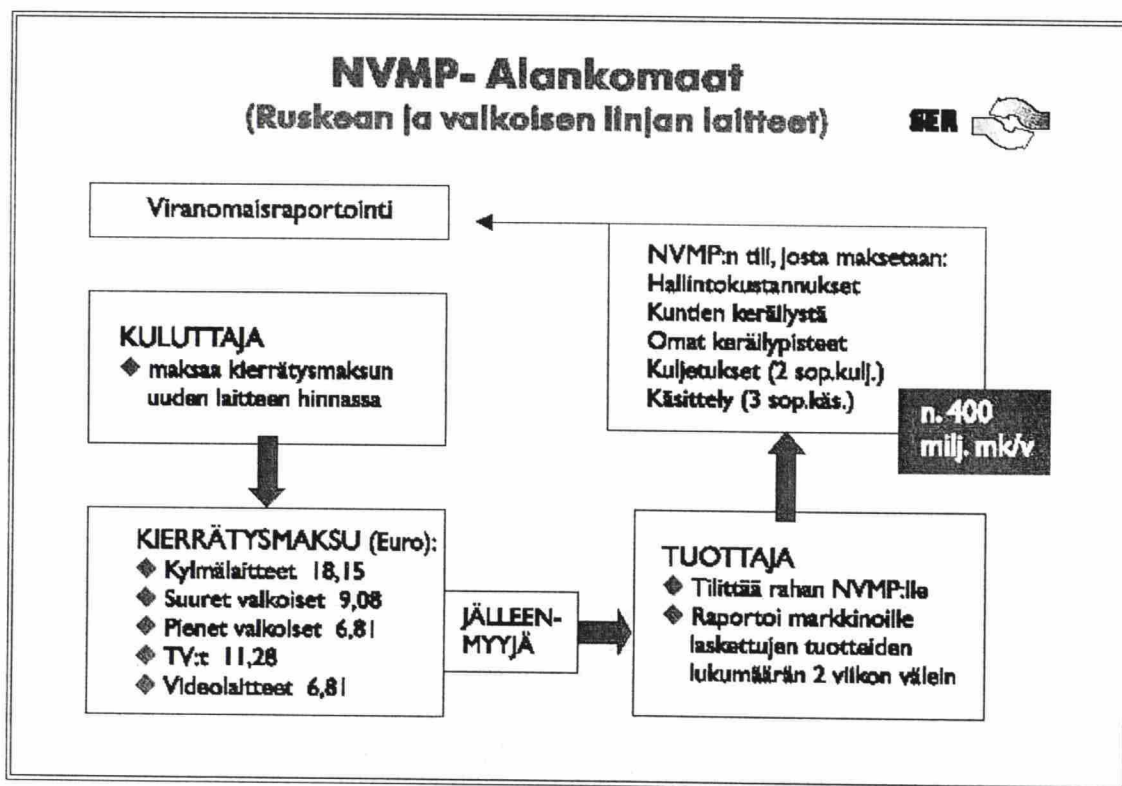
Kuva 3. Todellisiin kustannuksiin perustuva kierrätysjärjestelmä /1/.

ICT-malli voitaisiin toteuttaa myös Suomessa (esim. Kuva 3). Tätä kierrätysmallia voidaan pitää joustavana ja kustannustehokkaana. Järjestelmä on tuottajille edullinen, koska tuottajat maksavat vain todelliset omien tuotteidensa käsittelykustannukset. Tuottajilla on mahdollisuus kollektiivisesti neuvotella hinnoista sopimuskäsittelijöiden kanssa. Järjestelmän hallintokustannukset ovat pienet, koska sillä ei ole yhtiömuotoista organisaatiota eikä se hallinnoi rahaa. Etuna on myös se, että tuottaja voi hyödyntää myös omia kierrätysjärjestelmiään. Järjestelmä kannustaa myös ympäristömyötäiseen tuotesuunnitteluun, koska tuotesuunnitteluun panostaneille yrityksille SER:n käsittelyhintaa on alhaisempi.

3.2.2 Tuottaja siirtää vastuunsa kolmannelle osapuolelle (tuottajayhteisö)

Tämän vaihtoehdon periaatteet ovat seuraavat (Kuva 4):

- eri laitteille määrätään kiinteät kierrätysmaksut, jotka ovat merkistä riippumattomia,
- maksu kerätään kaikista markkinoille tulevista laitteista,
- kuluttaja maksaa kierrätysmaksun uuden laitteen oston yhteydessä,
- jälleenmyyjä tilittää rahat tuottajayhteisölle,
- tuottajayhteisö sopii SER:n keräyksestä, käsittelystä ja kuljetuksesta palveluja tarjoavien yritysten, julkisen sektorin sekä ympäristöviranomaisten kanssa sekä
- historiallinen romu maksetaan kollektiivisesti tuottajayhteisön varoista.



Kuva 4. Tuottajayhteisömalli /1/, /14/.

Tämä malli on tulossa merkittävänä vaihtoehtona myös Suomeen. Tällä hetkellä SER-tuottajayhteisöön kuuluu Suomessa 25 SE-laitteiden maahantuoja, valmistaja ja

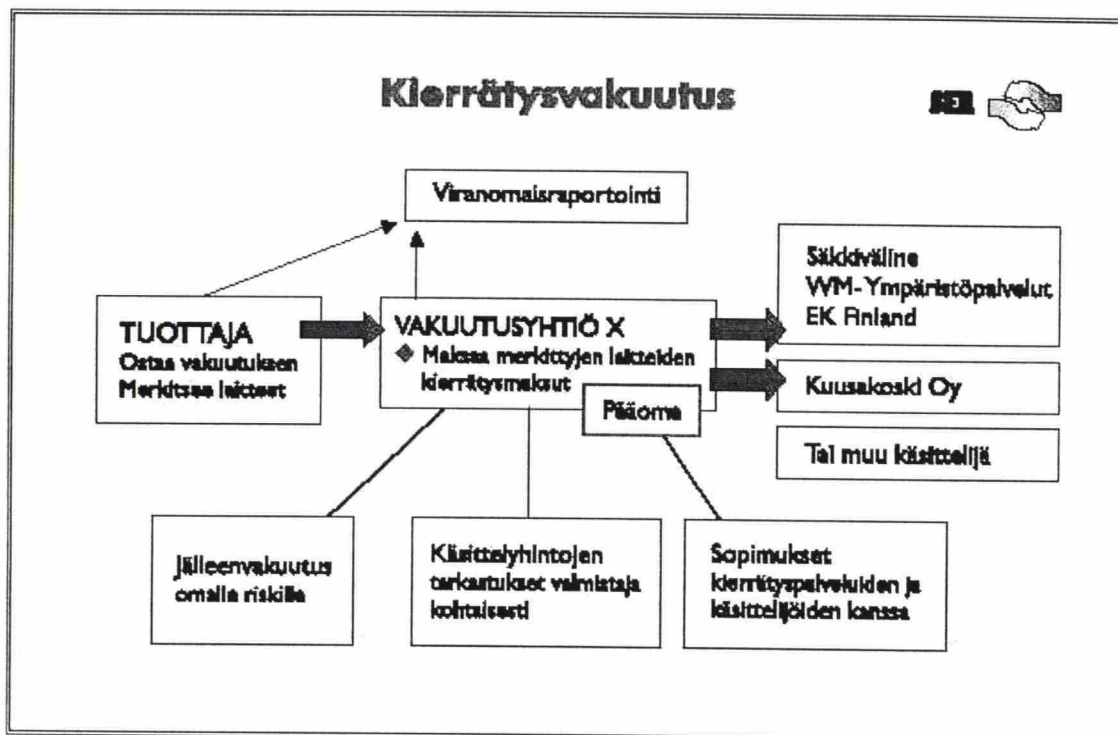
kauppiasta, jotka edustavat n. 80 % alan markkinoista. Tärkeimmistä tuotemerkeistä puuttuvat mm. Nokia, Electrolux, IBM, HP ja Compaq. Hollannissa saatujen kokemusten mukaan /39/ järjestelmällä saavutetaan korkea kierrätysaste; tämän johdosta materiaaalivirta on suuri, mikä johtaa myös alhaisempiin prosessointikustannuksiin.

Vaikka malli on suhteellisen yksinkertainen ja tuottajan kannalta varmasti helpoin vaihtoehto, ilmenee myös tässä mallissa paljon haittapuolia. Maksut eivät perustu todellisiin kierrätyskustannuksiin ja lisäksi laitekohtaisen maksun arviointi on hankalaa. Ylimääräisiä kustannuksia aiheuttavat organisaation perustamiskustannukset ja hallinnointikustannukset.

Kenties kaikkein tärkein ongelmakohta järjestelmässä on, ettei se kannusta yrityksiä ympäristömyönteiseen tuotesuunnitteluun, koska tuottajan vastuun aiheuttama kustannusrasitus on sidottu sovittuun kiinteään kierrätysmaksuun /41/. Tämä johtaa siihen, että kierrätyskustannuksen ja tuotesuunnittelun välinen linkki katoaa. Asian korjaamiseksi on kuitenkin esim. Hollannissa käynnistetty tutkimuksia. Tutkimuksessa mietitään, onko mahdollista kehittää systeemi, joka tunnistaa kierrätykseen tulevat laitteet, laskee yksilölliset kierrätyskustannukset ja vertaa niitä keskiarvoihin /39/.

3.2.3 Kierrätysvakuutus

Kierrätysvakuutuksessa tuottaja ottaa markkinoille tuomilleen laitteille kierrätysvakuutuksen. Vakuutusmaksuilla kertyvällä maksutulolla korvataan SE-laitteiden kierrätyskustannukset. Tässä tapauksessa vakuutusyhtiö kantaa riskin tuotteen kierrätyksestä ja kustannuksista. Vakuutusyhtiö myös järjestää tuottajan puolesta SE-laitteiden asianmukaisen kierrätyksen. Vakuutetut tuotteet merkitään vakuutustiedoilla, jolloin kierrätysyhtiö tunnistaa kierrätettävät laitteet. Kyseinen malli voitaisiin toteuttaa myös Suomessa (Kuva 5).



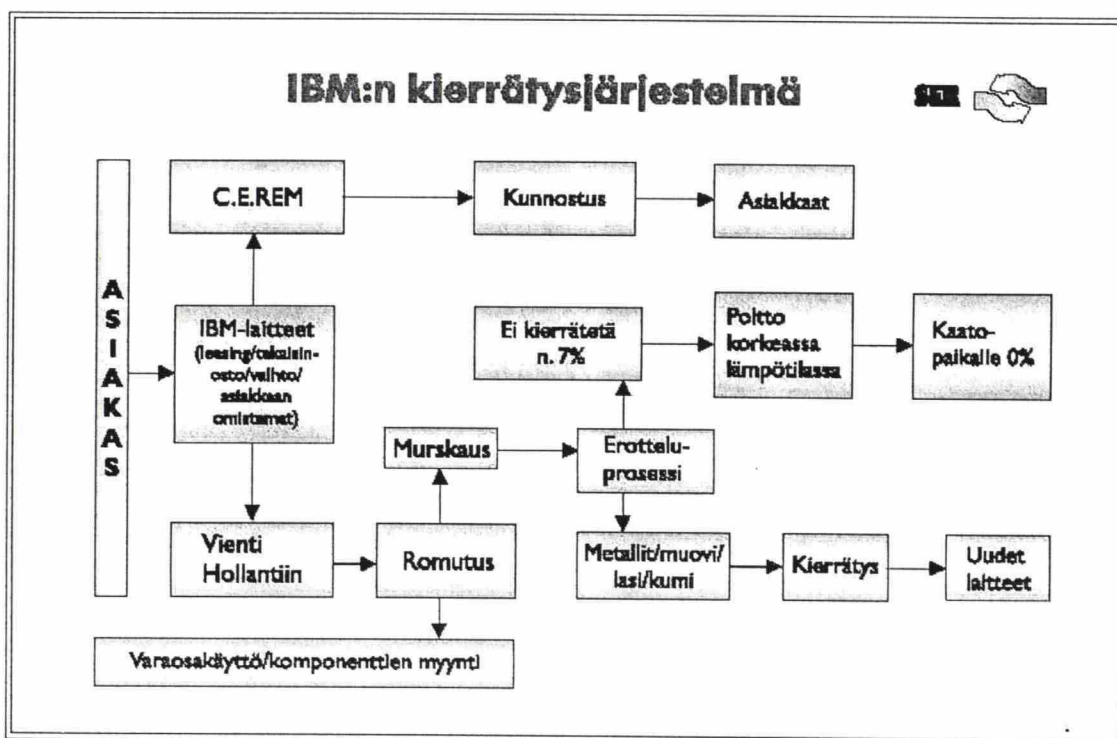
Kuva 5. Kierrätysvakuutus /1/.

Kierrätysvakuutuksessa hallintorakenne on valmiina vakuutusyhtiössä, joten tästä ei aiheudu perustamiskustannuksia. Järjestelmä on myös joustava, koska vakuutusyhtiö voi tarkistaa vakuutusmaksua vastaamaan käsittelyhintojen muutoksia. Lisäksi vakuutusyhtiö voi kilpailuttaa kierrätyspalveluita tarjoavia yrityksiä. Vakuutus toimii myös silloin, jos tuottaja poistuu markkinoilta. Vakuutus kattaa vakuutuskauden loppuun saakka markkinoille tuomien laitteiden kierrätyksen. Kierrätysvakuutuksessa voidaan ottaa myös huomioon ympäristömyötäinen tuotesuunnittelu. Helposti kierrätettäville tuotteille voidaan antaa alhaisempi vakuutusmaksu /1/.

3.2.4 Tuottajan oma kierrätysjärjestelmä

Tuottajat voivat hoitaa itse laitteidensa kierrätyksen. Omaa kierrätysjärjestelmää käyttävät yleensä suuret kansainväliset elektroniikka-alan yritykset. Yleensä järjestelmät toteutetaan yrityskohtaisesti, järjestelmää ei ole yleensä suunnattu kuluttajille.

Esimerkiksi IBM:llä on laaja yritysasiakkailta palautuvan tavaran kierrätysjärjestelmä (Kuva 6).

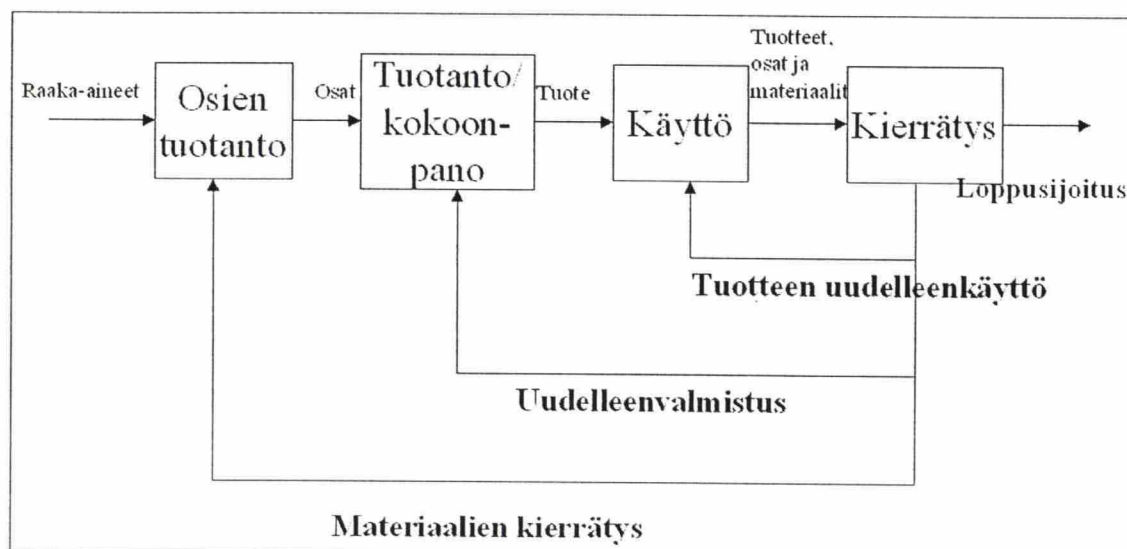


Kuva 6. IBM:n kierrätysjärjestelmä /1/.

3.3 KÄYTÖN JÄLKEISET TOIMINNOT

Ympäristön kuormituksen kannalta käytön jälkeiset toiminnot ovat tärkeässä asemassa. Mitä tuotteelle tehdään, kun se on palautunut kuluttajalta, riippuu useasta eri muuttujasta. Olennaisimmat muuttujat SE-laitteiden käytön jälkeisillä toiminnoilla ovat tuoteryhmä ja kuluttajan käyttäytyminen /40/. SE-laitteiden tuotekirjo on niin monipuolinen, ettei yksiselitteistä ohjetta, miten laite pitäisi käsitellä, voida antaa. Yleensä kuitenkin seuraavat mahdollisuudet ovat olemassa ympäristön kuormituksen kannalta edullisimmassa järjestyksessä (Kuva 7).

- uudelleenkäyttö tai –valmistus, laite huolletaan käyttöiän pidentämiseksi, myydään sellaisenaan toiselle kuluttajalle tai laitteen osia tai komponentteja käytetään uusiin tuotteisiin,
- materiaalien kierrätys, sisältää mahdollisen esikäsittelyn ja erotusprosessit sekä
- loppusijoitus tai poltto.



Kuva 7. SE-laitteiden, komponenttien ja materiaalien kiertokulku /18/, /19/.

Eri tuoteryhmille suositellaan erilaista käytön jälkeistä käsittelyä johtuen tuotteen ominaisuuksista (käyttöikä, teknologian kehitys, osien lukumäärä, vaaralliset aineet, muoti jne.). Hyvä esimerkki on TV, jonka elinikä on suhteellisen pitkä ja elinkaaressa käytön aikana aiheutuneet rasitukset dominoivat (energiansiirto). Elinikänsä aikana teknologia on kehittynyt niin paljon, että paras ratkaisu ei yleensä olekaan esim. jälleenmyynti vaan materiaalien kierrätys uusiin laitteisiin. Uusissa laitteissa mm. energiansiirto on alhaisempi, jolloin kokonaisympäristökuormitus jää pienemmäksi /42/. Sen sijaan esimerkiksi matkapuhelimella järkevin ratkaisu ympäristön kannalta on usein uudelleen käyttö, koska suurimman ympäristörasituksen elinkaaren aikana aiheuttaa tuotanto.

Voidaan myös arvioida, miten tuotteita poistuu markkinoilta ja mitkä ovat niiden suhteelliset osuudet kierrätyksessä. Arviointi voidaan tehdä huomioimalla tuotteen lukumäärä kotitalouksissa, tuotteen massa ja käyttöikä. Näin saadaan laskettua esimerkiksi, kuinka paljon romua kertyy tietyn tuoteryhmän laitteista ja laskettua suhteelliset massaosuudet (Taulukko 2).

Taulukko 2. Arvio eri tuotteiden massaosuuksista SER:sta /11/.

	Pesukone	Kylmälaitteet	Televisio	Liesi	Tietokone	Mikrouuni
Osuus (%)	28,1	12,7	8,8	8	6,3	6,2

Kuluttajien käyttäytymisen arviointi on tärkeää varsinkin tuotesuunnitteluvaiheessa.

Kuluttajat haluavat tuotteesta eroon yleensä kolmesta eri syystä /42/:

- tuote ei toimi,
- uudessa tuotteessa on paremmat ominaisuudet tai
- uusi tuote on muodikkaampi suunnittelultaan.

Eri SE-laitteet ja niissä olevat aineet ja komponentit aiheuttavat joko kustannuksia tai tuottoja kierrätysyrityksille. Yleisesti metallit, piirikortit ja virtakaapelit ovat kierrätysyritykselle arvokasta raaka-ainetta, kun taas kuvaputket ja muovit ovat ongelma aiheuttaen kustannuksia /21/.

3.3.1 Uudelleenkäyttö

Uudelleenkäytöllä tarkoitetaan tuotteiden tai niiden komponenttien käyttämistä siihen tarkoitukseen, johon ne on alunperin valmistettu. Esimerkiksi tietokoneesta uudelleenkäyttöön kelpaavat kovalevyt, Cd-rom-asemat, muistit ja piirilevyt. Uudelleenkäyttöön sopivia ovat myös kokonaiset yksiköt, kuten monitorit, matkapuhelimet ja tulostimet. Esimerkiksi HP:n omassa kierrätyskeskuksessa Rosevillessä Yhdysvalloissa jopa puolet sisään tulevasta materiaalmäärästä voidaan käyttää uudelleen uusissa tuotteissa sellaisenaan /27/.

3.3.2 Materiaalien kierrätys

Materiaalien kierrätys tulee kysymykseen, kun SE-laitetta tai sen komponentteja ei pysty enää hyödyntämään uudelleenvalmistuksessa tai uudelleenkäytössä. SE-laitteiden kierrätys sisältää mahdollisen esikäsittelyn ja erotusprosessit. SER:sta kierrätettävää materiaalia ovat pääasiassa metallit, lasi ja osa muoveista.

SER on kierrätyksen kannalta erittäin hankalaa, koska SER:ssa esiintyy lukuisia eri aineita ja komponentteja. Teknologian kehittyessä nykyisin pystytään kuitenkin suhteellisen tehokkaasti erottamaan esikäsitteltyjen SE-laitteiden materiaalit erilaisissa kierrätysprosesseissa. Kierrätyksen tulisi olla taloudellisesti kannattavaa sekä vähän ympäristöä rasittavaa. Nämä kaksi kriteeriä aiheuttavat tänä päivänä suurimmat esteet ja ongelmat SE-laitteiden kierrätyksen tehokkuudelle.

Taloudellisen kannattavuuden suurin este on manuaalinen esikäsittely, koska prosessi on työvoimavaltainen. Kannattavuuden parantamiseksi prosessoitavat määrät tulisivat olla mahdollisimman suuria ja ennakoitavissa, jotta kierrätyslaitteisiin kannataisi ylipäättään investoida. Esimerkiksi Suomessa harvaan asutuilla seuduilla kannattava kierrätys on yleensä mahdotonta. Tämä taas johtaa kasvaviin kuljetuskustannuksiin. Muita taloudellisuuteen vaikuttavia seikkoja ovat materiaalien markkinahinnat /32/.

Kierrätysprosesseissa materiaalien talteenotto ei saisi myöskään olla itsetarkoitus; ei ole järkevää yrittää ottaa talteen materiaalia, jos itse talteenottoprosessin negatiiviset ympäristövaikutukset ovat saavutettavaa hyötyä suuremmat, esim. runsas kemikaalien käyttö.

Kierrätyksessä tulisi aina käyttää parasta mahdollista käytössä olevaa teknologiaa (BAT). BAT:n myötä päästään alhaisempiin kustannuksiin, parempaan tuotteen laatuun, suurempaan kapasiteettiin ja turvallisempaan työympäristöön /22/. Erilaisten teknologioiden käyttö eri yrityksissä ja maissa vaikuttaa myös kierrätyskustannuksiin. Kysyttäessä Ericssonin TRX-laitteen (tukiaseman osa, joka vastaanottaa ja lähettää

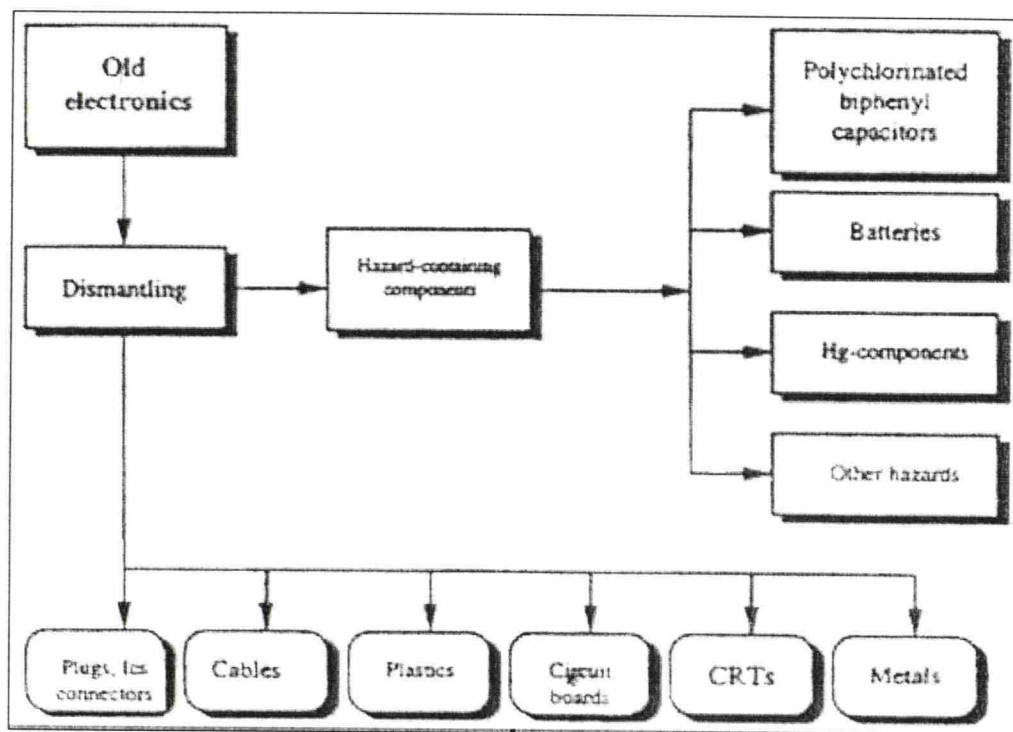
signaaleja) kierrätyskustannuksia eri maissa ja eri yrityksiltä, saatiin huomattavia eroja. Japanissa ja EU:ssa kierrätysyritykset laskuttavat Ericssonin kierrätyksen toteuttamisesta, kun taas USA:ssa materiaaleista saatavat tuotot aiheuttaisivat positiivisen kassavirran ja kierrätysyritys olisi näin ollen jopa valmis maksamaan Ericssonille laitteesta /30/.

Helpoiten kierrätettäviä materiaaleja ovat metallit, jotka ovat lähes ikuisesti kestäviä. Heikoiten pystytään kierrättämään muoveja, koska kierrätetyille muovituotteille ei ole markkinoita johtuen niiden ominaisuuksien muuttumisesta kierrätysprosessissa sekä primäärimuovin edullisuudesta.

3.3.2.1 Esikäsittely ja SE-laitteiden materiaalisällöt

SER:n esikäsittelyssä erotetaan laitteista vaarallisia aineita sisältävät osat (kohta 2.3.6), mahdolliseen uusiokäyttöön menevät osat ja komponentit sekä kaapelit, piirikortit ja muut helposti irti saatavat osat (Kuva 8). Vaaralliset aineet poistetaan, koska ne aiheuttaisivat ongelmia murskausvaiheessa. Esikäsittelyssä otetaan talteen myös helposti irrotettavat jalometallit, kuten kulta ja palladium, koska nämä on taloudellisesti järkevää erottaa jo tässä vaiheessa. Esikäsittely on suureksi osaksi manuaalista, minkä vuoksi se on myös kallista. Siksi jo tuotesuunnitteluvaiheessa tulisi miettiä, mitä materiaaleja tuotteessa käytetään.

Esikäsittelyssä erotetut osat ja aineet käsitellään omissa prosesseissaan: ne voidaan toimittaa hyödynnettäväksi, lähettää ongelmajätelaitokselle tai sijoittaa kaatopaikalle. Esim. SE-laitteiden esikäsittelyssä elohopea pyritään erottamaan ja lähettämään se jatkokäsittelyyn ongelmajätelaitokselle; kaapelit ja piirikortit käsitellään omissa prosesseissa, joista materiaali saadaan hyödynnettyä; muoveista suurin osa päätyy valvotuille kaatopaikoille.



Kuva 8. Manuaalinen esikäsittely (Gotthard Ragn-Sells Elektronikåtervinning) /11/.

Ongelmajätteet, kuten vaaralliset aineet, toimitetaan ongelmajätelaitokseen. Orgaaniset ongelmajätteet käsitellään termisin menetelmin polttolaitoksella korkealämpötilauunissa (lämpötila keskimäärin 1350 °C) tai keskilämpötilauunissa (lämpötila keskimäärin 850 °C). Polttaminen on edelleen varmin ja turvallisoin orgaanisten ongelmajätteiden käsittelymenetelmä. Polton energia hyödynnetään kaukolämpönä, sähköinä ja prosesseissa. Suuri osa tuhkasta päätyy hyötykäyttöön ja erikoiskaatopaikalle. Kiinteä jäte eli kuona käsitellään vielä keskilämpötilauunissa, minkä jälkeen se soveltuu käytettäväksi esimerkiksi katemateriaalina. Metallit päätyvät metalliteollisuuden hyödynnettäviksi /34/. Epäorgaaniset ongelmajätteet, kuten hapot, emäkset ja syanidit käsitellään fysikaaliskemiallisilla menetelmillä. Menetelminä ovat neutralointi sekä metallien saostus, hapetus ja pelkistys.

3.3.2.1.1 TV:t ja monitorit

TV:n ja monitorin pääasialliset materiaalit ovat lasi ja muovi (Taulukko 3). Lasia esiintyy kuvaputkessa ja muovia rungossa.

Taulukko 3. TV:n ja monitorin materiaalisältö /35/.

	Kuvaruutulasi	Muovi	Kartiolasi	Fe	Piirikortit	Muut metallit	Muut
Osuus (%)	31	27	13	10	8	8	3

Kuvaputkia sisältävät TV:t ja monitorit luokitellaan vuoden 2002 alusta ongelmajätteeksi. Esikäsittelyssä TV:stä ja monitoreista erotetaan ainakin seuraavat osat: kuvaputki, muovikotelo, piirikortit ja virtakaapeli. Osat tulee WEEE-direktiivin määräysten mukaisesti erotella, koska kuvaputki sisältää lyijyä ja muovikuoret sekä piirikortit sisältävät usein bromattuja palonestoaineita.

Kuvaputkessa on kaksi eri lasikoostumusta: kartio-osa, joka sisältää paljon lyijyä sekä kuvaruutulasi, joka on n. 2/3 koko kuvaputken painosta. Esikäsittelyssä kuvaputki halkaistaan kahtia siten, että eri materiaalia olevat kuvaruutulasi ja kartiolasi erotetaan toisistaan. Kuvaruutulasin sisäpinnalta imuroidaan ongelmajätteeksi luokiteltava loisteaine pois. /34/. Kuvaputkien esikäsittelyä Suomessa tekee mm. Ekokem, sen sijaan Kuusakoski toimittaa kokonaiset kuvaputket Saksaan.

3.3.2.1.2 Tietokoneet

Tietokoneen pääasialliset materiaalit ovat rauta ja muovi, jotka molemmat ovat päämateriaalina tietokoneen rungossa. (Taulukko 4).

Taulukko 4. Tietokoneen materiaalisältö /35/.

	Fe	Muovi	Muut metallit	Piirikortit	Muut
Osuus (%)	56	27	9	5	3

Tietokoneen (ilman monitoria ja oheislaitteita) esikäsittelyssä koneesta poistetaan kuoren muoviosat ja piirikortit, jotka sisältävät bromattuja palonestoaineita. Lisäksi leikataan

virtakaapelit sekä irrotetaan elohopeakytkimet, piirikortit ja akut. Myös rautaa paljon sisältävä runko erotetaan käsiteltäväksi sellaisenaan jatkokäsittelyssä.

3.3.2.1.3 Pesukoneet ja liedet

Pesukoneen pääasialliset materiaalit ovat rauta ja betoni (Taulukko 5). Rauta esiintyy rungossa, betoni painona.

Taulukko 5. Pesukoneen materiaalisältö /35/.

	Fe	Betoni	Muovi	Muut metallit	Muut
Osuus (%)	59	20	12	8	1

Pesukoneet ja liedet eivät sisällä kovinkaan paljon osia tai materiaaleja, jotka vaativat esikäsittelyä. Pesukoneista poistetaan betonipaino, koska se haittaa jatkokäsittelyä. Virtakaapeli katkaistaan ja myydään jatkokäsittelyyn. Laitteissa on myös jonkin verran muoviosia, jotka saattavat sisältää bromattuja palonestoaineita. Liedet sisältävät myös elohopeakytkimiä, jotka poistetaan.

3.3.2.1.4 Kylmälaitteet

Kylmälaitteiden (jääkaappi, pakastin) pääasialliset materiaalit ovat rauta ja muovit (Taulukko 6). Rautaa esiintyy rungossa ja kompressorissa, muovia erilaisissa suojalevyissä ja hyllyköissä. Freonikaasua sisältävä polyuretaanivaaho on kylmälaitteessa eristeenä.

Taulukko 6. Kylmälaitteiden materiaalisältö /35/.

	Fe	Muovit	PUR-vaaho	Lasi	Muut metallit	Öljy	Muut
Osuus (%)	60	20	8	4	5	1	2

Kylmälaitteet on luokiteltu ongelmajätteeksi vuoden 2002 alusta lähtien. Esikäsittelyssä laitteista imetään ensin nestemäinen freonipitoinen kylmäaine (CFC) ja kompressorioiljy talteen. Tämän jälkeen kompressorin irtonaiset osat ja elohopeakytkimet irrotetaan runkosasta. Esikäsittelyssä kylmälaitteista poistetaan myös elohopeakytkimet ja leikataan virtakaapelit.

Ongelmalliseksi kylmälaitteiden käsittelyn tekee eristeenä oleva polyuretaanivaahdo. Vaahdon sisältämä freonikaasu ei saa päästä murskausvaiheessa ympäristöön, eikä kaasua pysty esikäsittelyssä poistamaan /34/, /35/. Kylmälaitteet käsitelläänkin yleensä omana prosessinaan esikäsittelyn jälkeen. Suomessa ainakin Ekokemillä on ympäristövaatimukset täyttävä kylmälaitteiden käsittelylaitos, missä freonikaasu otetaan talteen kaasutiiviin murskauksen yhteydessä ja syötetään suoraan ongelmajätepolttoon.

3.3.2.1.5 Matkapuhelimet

Matkapuhelimen pääasialliset materiaalit ovat muovi, keraamit ja metallit (Taulukko 7).

Taulukko 7. Matkapuhelimen materiaalisisältö /36/.

	Muovi	Keraamit	Kupari	Epoksi	Muut metallit	Muut
Osuus (%)	47	16	15	9	7	6

Matkapuhelin on kierrätyksen kannalta hieman poikkeava verrattuna muihin SE-laitteisiin /15/. Uusia puhelinmalleja tulee jatkuvasti, joten yksittäisen puhelimen käyttöikä jää varsin lyhyeksi. Puhelin myydään helposti toiselle käyttäjälle, joten kyse on uudelleenkäytöstä, mikä on tietenkin ympäristön kuormituksen kannalta edullinen vaihtoehto. Puhelimien pieni koko vaikeuttaa keräilyä; puhelimia palautuu kierrätykseen vähän verrattuna muihin laitteisiin, koska se on helppo heittää esim. jäteastiaan.

Suurimmat kustannukset matkapuhelimen kierrätyksessä syntyvät yleensä materiaalin keräämisestä ja kuljetuksesta, ei niinkään materiaalin jälleenkäsittelystä; matkapuhelin onkin kierrättäjälle yleensä taloudellisesti kannattavaa johtuen mm. jalometallien määrästä ja vaarallisten aineiden vähydestä.

Matkapuhelimen esikäsittelyn helpottamiseksi mm. Nokia on tutkinut ns. tuotteen aktiivista purkamista. Siinä tuotteen sisälle rakennetaan automaattinen ”purkutoiminto”, joka aktivoidaan matkapuhelimen poistuttua käytöstä. Tällöin puhelimesta saadaan erotettua halutut osat ilman manuaalista esikäsittelyä /44/.

3.3.2.2 Erotusprosessit

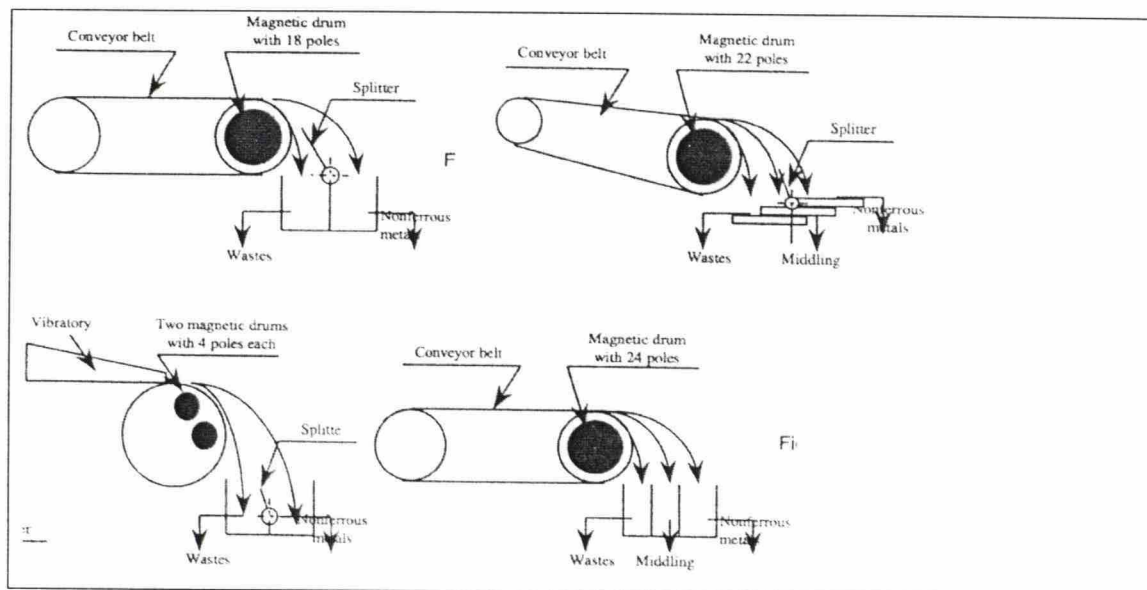
Esikäsittelyn jälkeen SER:sta erotetaan jäljellä olevat materiaalit hyötykäyttöön. Erotusprosesseissa pyritään saamaan SER:sta erilaisia jakeita, kuten jalometallit, muovit, rautapitoiset metallit, ei-rautapitoiset metallit ja lasi. Erotusprosessien syöte on esikäsittelystä tullutta SER:a. Erotusprosesseissa käytetään materiaalien tiheyteen, sähkönjohtavuuteen ja magneettisuuteen perustuvia menetelmiä.

3.3.2.2.1 Mekaaniset erotusprosessit

Metallit pystytään kierrättämään SER:sta parhaiten. Metallien kierrätys tapahtuu murskaamalla laitteet ja erottelemalla tämän jälkeen metallit muusta materiaalista joko fysikaalisilla tai kemiallisilla prosesseilla. Murskaimessa tärkeää on saada materiaali siihen muotoon, että saatava syöte soveltuu tuleviin prosesseihin. Yleisimmin käytetään rengas- ja leikkurimurskaimia. Murskauksen jälkeen materiaali on yleensä –40 mm.

Raudan erottamiseen SE-laitteista käytetään yleensä magneettierotinta. Prosessissa erotetaan magneettinen (rautapitoinen) ja ei-magneettinen jae toisistaan. Kun rautapitoinen aines on saatu erotettua, jäljelle jää metalleja, jotka eivät sisällä rautaa (kupari, alumiini, sinkki, lyijy, magnesium), muovia ja lasia.

Tämän jälkeen metallipitoinen jae erotetaan muovista ja lasista. Yleisimmin käytetty on sähkönjohtavuuteen perustuva eddy current -erotin. Ohessa on esitetty muutamien valmistajien pyöriviä eddy current -erottimia (Kuva 9). Näillä erottimilla pystytään erottelemaan tehokkaasti 5-40 mm:n rakeita.



Kuva 9. Erilaisia eddy current -erottimien kaaviokuvia /11/.

Ensimmäisiä eddy current -erottimia rakennettiin jo 1800-luvun lopulla ja viime vuosina laitteita on edelleen kehitetty. Nykyään laitteet ovat dynaamisia erottimia, joissa on kestmagneetit. Eddy current -erottimissa on erityisen tärkeää ottaa huomioon muuttujat, jotka vaikuttavat metallien saantiin ja pitoisuuteen. Tärkeimpiä muuttujia ovat raekoko, raemuoto, sähköjohtavuus sekä magneettisen rullan pyörimisnopeus ja sijoitus. Raekoolla on erottimessa suurin merkitys; mitä pienempiä rakeet ovat, sitä vaikeampi on eri materiaalit erottaa toisistaan /11/.

Toinen tärkeä menetelmä ei-rautapitoisen jakeen erotteluun on sink-float -menetelmä. Ominaispainoon perustuvalla menetelmällä pystytään erottamaan mm. alhaisen tiheyden omaavat muovi (n. 1 g/cm^3) ja magnesium ($1,74 \text{ g/cm}^3$) korkeamman tiheyden omaavista aineista sopivassa väliaineessa.

Tämän jälkeen materiaalijakeet toimitetaan uudelleen hyötykäyttöön: metallijakeet sulattoihin, lasi uusiokäyttöön ja muovit poltettaviksi. Sulatoissa otetaan talteen myös jalometallit, joita syöte vielä sisältää. Jalometallien talteenotto missä tahansa prosessin

vaiheessa on yleensä kannattavaa. SER:n materiaalien myynnistä saatavista tuotoista esim. kulta kattaa peräti 86 %, kun taas kuparista saadaan vain 4% /33/.

3.3.2.2 *Pyrometallurgiset erotusprosessit*

Kuparisulattoon menevä SER sisältää usein monia eri materiaaleja, mikä tekee sulatusprosessista vaikean niin ympäristön kuin prosessin hallinnan kannalta.

Nykyisille SE-laitteille on tyypillistä, että ne sisältävät ainakin yhden piirikortin. Piirikortit ovat ongelmallisia käsitellä niiden monimutkaisen ja vaihtelevan materiaalisäällön vuoksi. Keskeisimmät piirikortin materiaalit ovat muovit (sisältäen usein palonestoaineita), metallit (kulta, hopea, platina, palladium, kupari, alumiini, kromi, lyijy, beryllium, elohopea, kadmium, sinkki, rauta sekä nikkeli) ja keraamit /28/. Kuparia esiintyy yleensä pinnoitteena ja johdoissa. Kuparia on piirikorteissa n. 15-25 %.

Piirikortit irrotetaan esikäsittelyssä ja niistä poistetaan vaaralliset aineet (elohopea, kadmium) sekä muut jatkokäsittelyä haittaavat aineet (beryllium). Esikäsittelyssä otetaan talteen myös helposti irrotettavat jalometalleja sisältävät komponentit. Tämän jälkeen piirikortti voidaan katsoa olevan valmis sulatettavaksi kuparisulatossa, mutta myös mekaaniset ja hydrometallurgiset prosessit ovat mahdollisia jatkokäsittelymahdollisuuksia /45/, /46/.

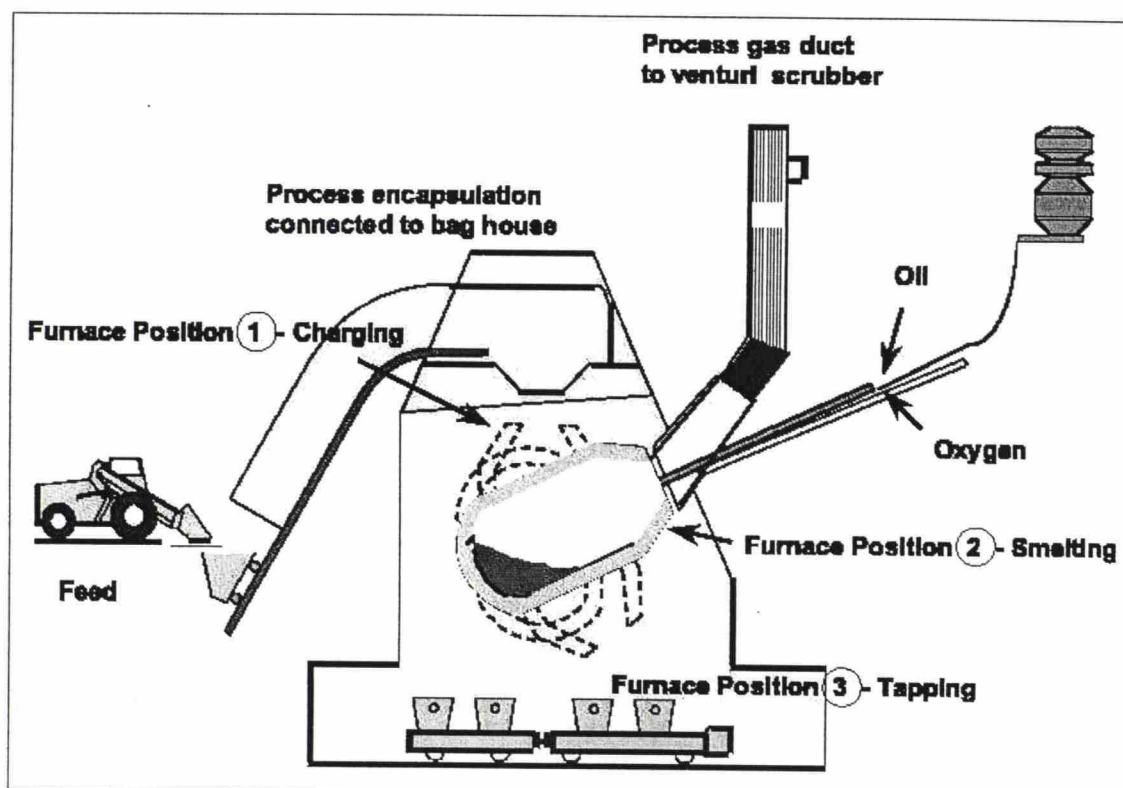
Mekaanista prosessointia (murskaus, seulonta, tärypöytä jne.) käytetään, jos piirikortin kupari- ja jalometallipitoisuudet ovat alhaisia. Mekaanisen prosessoinnin jälkeen kuparirikaste lähetetään kuparisulattoon. Mekaanisessa prosessoinnissa kannattaa pyrkiä korkeaan saantiin pitoisuuden kustannuksella, koska jae käsitellään vielä kuparisulatossa /46/.

Kuparisulatossa anodikupariin kerääntyy kupari, nikkeli ja jalometallit. Kuparianodit lähetetään edelleen jatkojalostukseen elektrolyysiin. Kuonaan joutuu alumiinia, sinkkiä, lasi, keraamit, pii, kromi ja rauta. Kuona pyritään hyötykäyttämään esim. tien

täyttöaineena. Kuona voidaan myös johtaa jatkoprosessiin, missä esimerkiksi sinkki saadaan talteen. Pölyssä esiintyy alumiinia, sinkkiä ja lyijyä.

Tärkeä huomioonotettava asia sulatusprosessissa on orgaanisten aineiden, kuten muovien, palaminen. Koska SER sisältää runsaasti mm. erilaisia palonestoaineita, palamisessa syntyvät kaasut (dioksiini ja furaani) ovat erittäin haitallisia ympäristölle.

Boliden Minerals AB:lla on käytössään Kaldo-uuni (Kuva 10), joka on alun perin kehitetty lyijyn sulatusta varten. Nykyisin uuniin voidaan syöttää myös SER:a. Panostus (esimerkiksi piirikortteja) uuniin tapahtuu yläpuolelta, jolloin uuni on pystysuorassa (vaihe 1). Panostuksen jälkeen uuni käännetään prosessiasentoon (vaihe 2). Prosessissa uuniin johdetaan happea sekä lisäpolttoaineena öljyä tarpeellisen lämpötilan saavuttamiseksi. Myös panostettu palava materiaali tuottaa lämpöä prosessiin. Syntyvät kaasut kerätään jäähdytettyyn savukaasukanavaan, missä savukaasut puhdistetaan jälkipolton ja savukaasupuhdistuksen avulla. Kaasut johdetaan tämän jälkeen rikkihappotehtaalle, missä tuotteina saadaan nestemäistä rikkidioksidia ja rikkihappoa. Prosessissa saadaan sulana talteen (vaihe 3) mm. kupari, nikkeli ja jalometallit, jotka johdetaan edelleen jalostettaviksi. Pölyn mukana poistuva lyijy kerätään myös talteen ja tuotteistetaan omassa prosessissa. Kaldo-uunin etuja ovat lyijyn talteen saaminen, savukaasujen puhdistus sekä palavien aineiden hyödyntäminen energiana /50/.



Kuva 10. Kaldor-uuni /50/.

3.3.2.2.3 Kuusakoski Oy

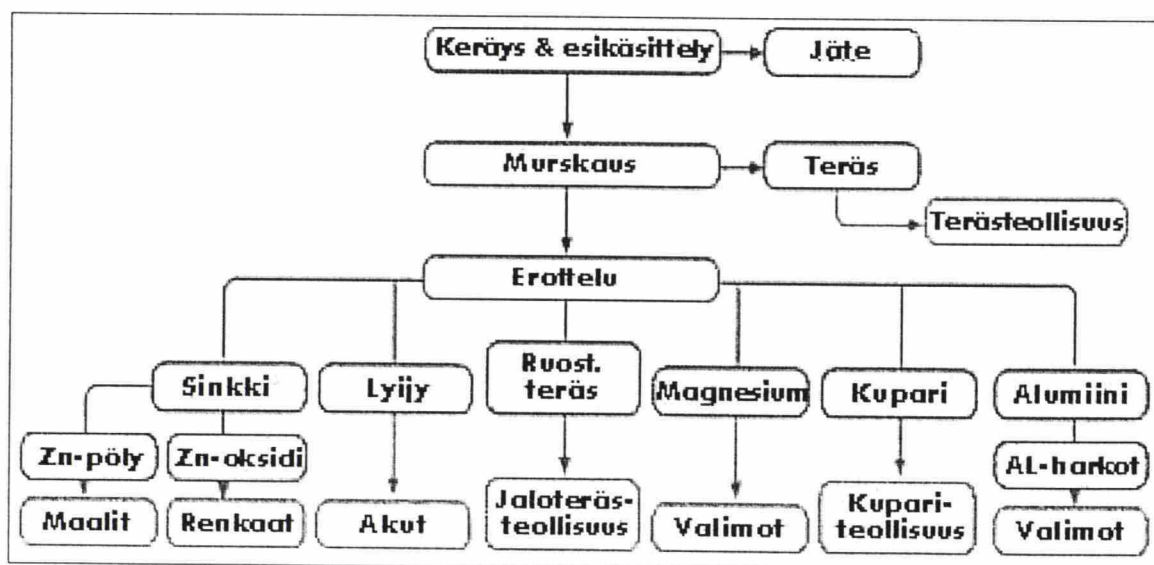
Kuusakoskella materiaalit erotetaan toisistaan monimetalliprosessissa (Kuva 11). Materiaalin esikäsittelyssä syntyvä jäte pitää sisällään myös hyödynnettäviä osia. ”Jätejakeeseen” kuuluu mm. kaapelit, jotka toimitetaan Kuusakosken omalle jatkokäsittelylaitokselle, missä kupari ja muovit otetaan talteen. Piirikortit toimitetaan jatkokäsittelyyn, missä kortit murskataan ja toimitetaan metallisulattoon. Jätteeseen kuuluu muovit, jotka toimitetaan valvotulle kaatopaikalle tai kierrätykseen ja ongelmajätteet, jotka toimitetaan ongelmajätelaitokseen.

Esikäsittely romu murskataan rengasmurskaimessa (isoille SE-laitteille esimurskaus). Tämän jälkeen rautapitoinen jae erotetaan magneettierottimella. Jakeen Fe-pitoisuus on n. 95% ja se myydään terästeollisuuteen sulatettavaksi. Ei-rautapitoinen jae jatkaa

prosessissa ensin seulontaan, missä alitteesta saadaan talteen hieno jae, joka sisältää ohuita kuparilankoja. Tämä jae toimitetaan kuparisulattoon.

Seulalta tullut ylitte syötetään kaksivaiheiseen sink-float -prosessiin. Ensimmäisessä vaiheessa ylitteeseen saadaan magnesium ja sitä kevyemmät materiaalit, kuten kumi ja muovi. Magnesium erotetaan ei-metallisesta materiaalista eddy current -erottimella. Toisessa sink-float -vaiheessa ylitteeseen saadaan pääasiassa alumiinia. Alumiinin kanssa saman jakeeseen joutuu myös muovipäällysteisiä kuparilankoja, jotka omaavat saman tiheyden. Nämä erotellaan alumiinista eddy current -menetelmällä. Näin saadun alumiinin pitoisuus on n. 98%. Alumiini ja magnesium seostetaan valimoiden raaka-aineeksi.

Sink-float -prosessin alite on monimetallijae, joka sisältää mm. kuparia, sinkkiä ja ruostumatonta terästä. Tämä jae voidaan joko myydä suoraan metalliteollisuudelle tai toimittaa käsinlajitteluun. Käsinlajittelussa erotellaan eri metallit omiin jakeisiinsa. Sinkkiromu höyrytetään sinkkitehtaassa ja höyry hapetetaan sinkkioksidiksi tai lauhdutetaan sinkkipölyksi. Muut jakeet myydään metalliteollisuudelle /8/, /10/.



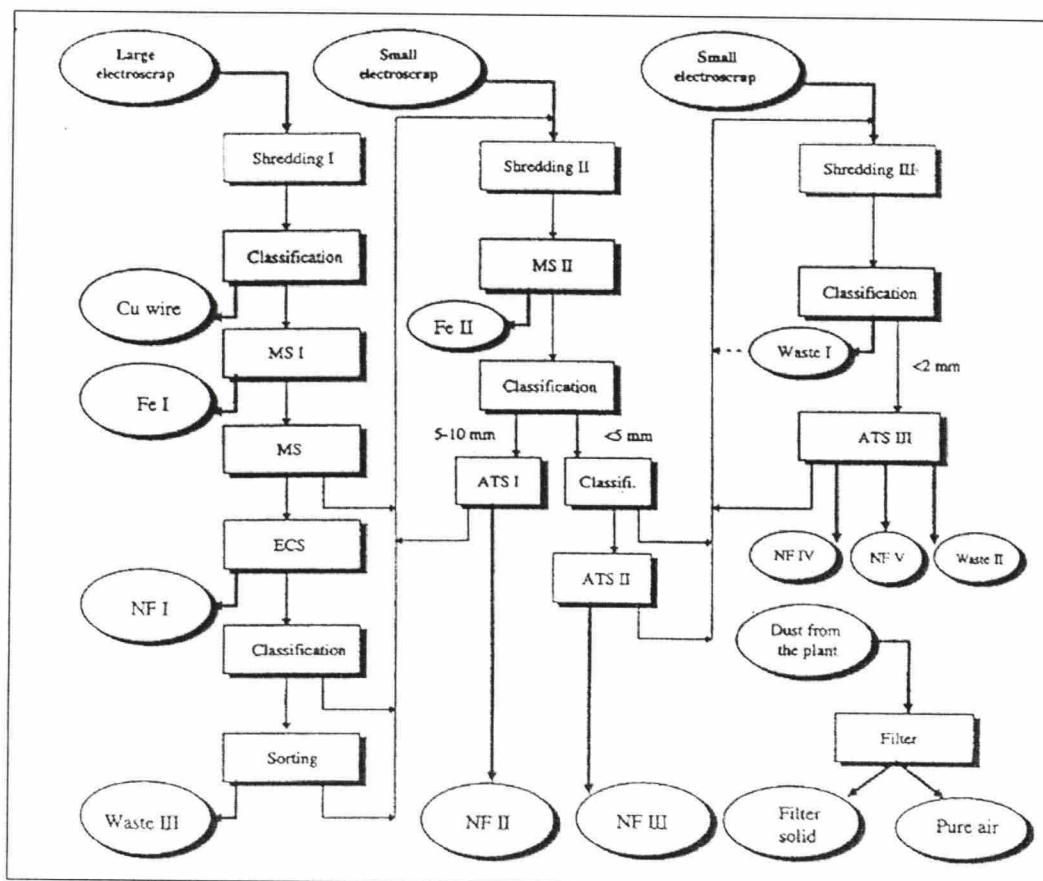
Kuva 11. Kuusakosken monimetalliprosessi /8/, /10/.

3.3.2.2.4 Noell Abfall und Energietechnik GmbH

Saksassa sijaitsevan kierrätyslaitoksen kapasiteetti on 21 000 tonnia vuodessa ja se on puhtaasti suunniteltu SER:n prosessointiin (Kuva 12). Huomionarvoinen seikka on, että kaikki prosessivaiheet ovat mekaanisia. Ennen prosessia laitteille suoritetaan esikäsittely ja lajittelu kolmeen jakeeseen koon mukaan. Kukin jae murskataan omassa murskaimessaan. Isojen laitteiden murskaimen tuote seulotaan ja alitteesta saadaan hieno materiaali, mikä sisältää ohutta kuparilankaa, talteen. Tämän jälkeen magneettisella erotuksella (MS, MS I) erotetaan rautapitoinen jae (Fe I). Eddy current -erottimessa (ECS) erotetaan ei-rautapitoinen metallijae (NF I) mm. muovista ja lasista. eddy current -erotusta käytetään, koska sen on todettu olevan paras menetelmä partikkelikoolle 5-200 mm /11/.

Osa ensimmäisen vaiheen jakeesta jatkaa toiseen vaiheeseen, jossa mukaan syötteeseen tulee myös pieniä SE-laitteita. Jae murskataan edelleen pienemmäksi. Sen jälkeen jakeelle suoritetaan jälleen magneettinen erotus ja seulonta. Seulonnassa erotetaan jakeet 5-10 mm:n ja <5 mm:n jakeisiin. Erotusprosessi suoritetaan tämän jälkeen tärypöydillä, mistä saadaan talteen ei-rautapitoiset metallijakeet. Tärypöytä soveltuu rakeille < 10 mm.

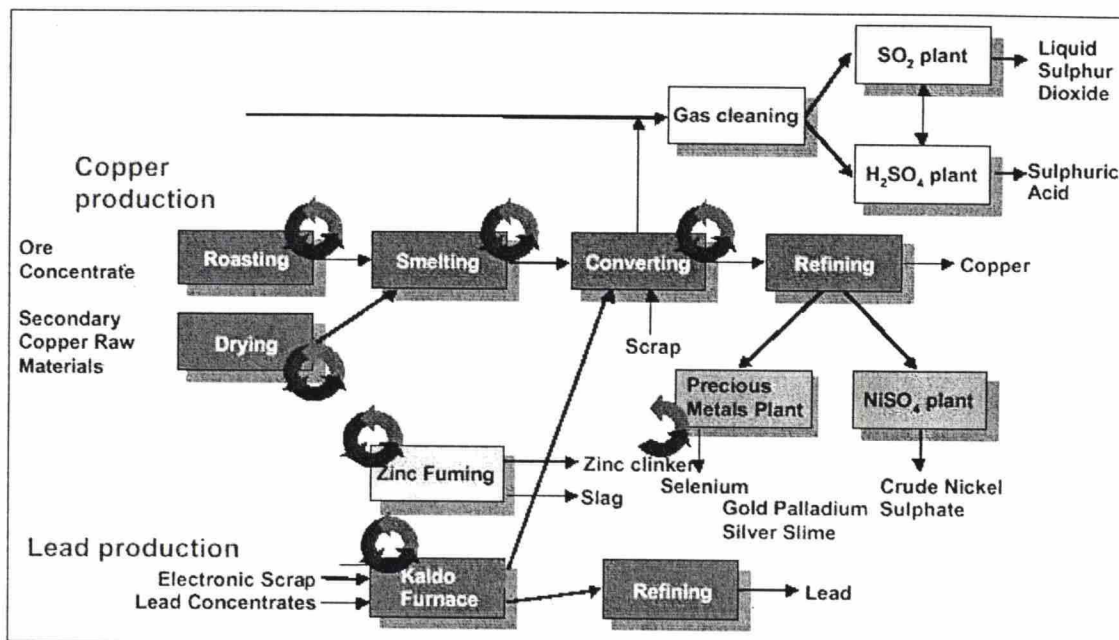
Prosessin kolmannessa vaiheessa syöte murskataan raekokoon < 2 mm. Tämän jälkeen tärypöytien avulla erotetaan omaksi jakeekseen ei-rautapitoiset metallijakeet.



Kuva 12. Noell Abfall und Energietechnik GmbH:n kierrätysprosessi /11/.

3.3.2.2.5 Boliden Minerals AB

Boliden Minerals AB on erikoistunut SER:n kierrätykseen tehtaallaan. Prosessi on puhtaasti pyrometallurginen (Kuva 13). Ensimmäinen vaihtoehto on johtaa SER ensin Kaldo-uuniin (kts. kohta 3.3.2.2.2 Pyrometallurgiset erotusprosessit), mistä sula materiaali johdetaan konvertteriin. Jatkojalostuksessa, kuten elektrolyysissä, saadaan erotettua tuotteiksi mm. kupari, jalometallit ja nikkeli.



Kuva 13. Boliden Minerals AB:n prosessi /50/.

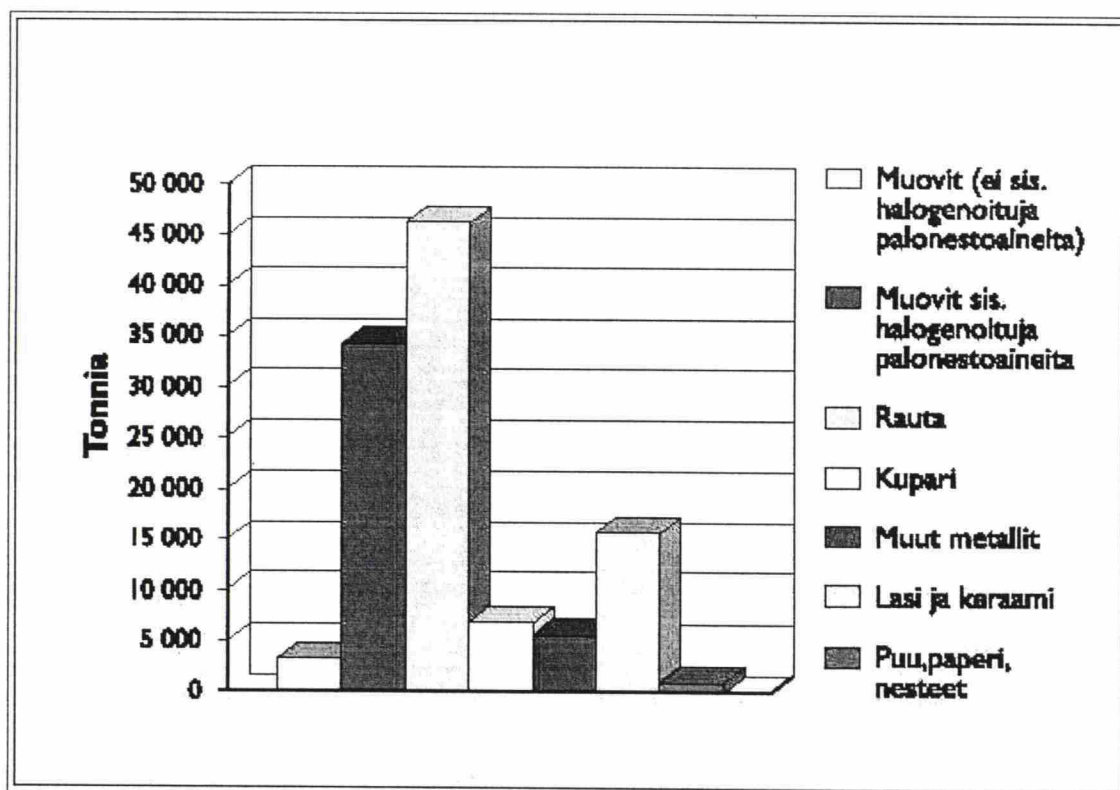
3.3.3 Loppusijoitus tai polttaminen

Kun materiaali ei ole jostakin syystä kierrätettäväksi kelpaavaa, joudutaan se poistamaan materiaalikierrasta. Tarkasteltaessa esimerkiksi Kuusakosken prosessia, voidaan todeta, että prosessista poistuvat materiaalivirrat ohjautuvat ongelmajätelaitokseen (ongelmajätteet), kaatopaikalle (muovit) tai metallisulattoihin (metallijakeet).

Ongelmajätelaitoksessa vaaralliset aineet hävitetään yleensä polttamalla. Sulatusprosessissa saadaan talteen hyödynnettävät metallit. Syntyvä kuona voidaan laskea hyödynnettäväksi, vaikka se ”loppusijoitetaan” esimerkiksi tien täyteaineeksi. Vaikeimmin kierrätettäviä SER:ssa ovat erilaiset muovit. Muovit joudutaan usein sijoittamaan valvotuille kaatopaikoille, koska niissä esiintyvien lisäaineiden vuoksi niitä ei voida monessakaan laitoksessa polttaa. Kuitenkin on olemassa laitoksia, missä poltossa syntyneet myrkylliset kaasut saadaan talteen ja näin ollen muovi voidaan hyödyntää energiana.

4 SE-LAITTEISSA ESIINTYVÄT KESKEISIMMÄT MATERIAALIT JA YHDISTEET SEKÄ NIIDEN KIERRÄTYS

SE-laitteissa esiintyy lukuisa määrä eri materiaaleja ja yhdisteitä, mikä tekee SER:n kierrättämisestä hankalaa. Direktiiveissä määritellään erikseen SER:ssa esiintyvät vaaralliset aineet, joiden käyttö tulisi minimoida. Keskeisiä valmistusmateriaaleja SE-laitteissa ovat teräs, kupari, muovit sekä lasi. Näiden määrät vaihtelevat huomattavasti riippuen tuoteryhmästä. Ohessa on esitetty SE-laitteista kertyvien materiaalien määrät vuonna 1997 (Kuva 14). Suomessa direktiivien tuoteryhmät 1, 2, 3 ja 5 käsittävät noin 80 % markkinoille tulevien laitteiden volyymistä.



Kuva 14. Päätuoteryhmistä kertyvät materiaalit /1/.

SER päämateriaalit ovat metallit 57% (rauta, teräs ja sen yhdisteet, alumiini ja sen yhdisteet, kupari ja sen yhdisteet, lyijy, sinkki, tina, kulta, hopea ja palladium), muovit 22% ja lasi (9%) /28/.

4.1 VAARALLISET AINEET

4.1.1 Kadmium

SE-laitteissa kadmiumia käytetään painettujen piirilevyjen komponenteissa, kuten pintaliitosvastuksissa, infrapunailmaisimissa ja puolijohteissa. Vanhantyyppiset katodisädeputket sisältävät yleensä kadmiumia. Kadmiumia käytetään myös PVC-muovien stabilointiaineena /3/, /48/.

SE-laitteiden akut ja paristot sisältävät usein kadmiumia. NiCd-akut ovat yleisiä sähkötyökaluissa. NiCd-akuissa aktiivisina elektronimateriaaleina ovat nikkelihydroksidi Ni(OH)_2 ja kadmiumhydroksidi Cd(OH)_2 . Akkuja ladattaessa elektronimateriaalit muuttuvat nikkelioksihydroksidiksi NiOOH ja kadmiumiksi. Elektrolyytinä on väkevä kaliumhydroksidin KOH vesiliuos.

Vaarallisten aineiden luokitusta ja merkintöjä koskevassa neuvoston direktiivissä kadmium ja kadmiumyhdisteet luokitellaan seuraavasti /3/:

- terveydelle haitallista ja myrkyllistä hengitettynä, joutuessaan iholle ja nieltynä,
- terveydellisten haittojen vaara pitkäaikaisessa altistuksessa,
- pysyvien vaurioiden vaara sekä
- syöpäsairauden vaara (kadmiumkloridi, kadmiumoksidi).

Merkittävimmät tunnetut vaikutukset terveyteen ovat munuaisten toimintahäiriöt, kasvuhäiriöt, luustovauriot ja lisääntymiskyvyn heikkeneminen /3/, /38/.

4.1.2 Lyijy

SE-laitteissa lyijy esiintyy lähinnä painettujen piirilevyjen juotoksissa, kuvaputken lasissa, hehkulampuissa ja loisteputkissa. Esimerkiksi television kuvaputken lasissa lyijyä on peräti 2 kg. Lyijy-yhdisteitä käytetään myös lisäaineena PVC-muoveissa parantamaan korkealämpötilakestävyyttä /3/, /48/.

SE-laitteiden akut ja paristot ovat usein myös lyijypohjaisia, useimmiten lyijyakku esiintyy kuitenkin auton akuissa. Elektrodeina toimivat lyijyoksidi ja lyijy, johon on yleensä seostettu kalsiumia, antimonia ja arseenia. Elektrolyytinä on vesi-rikkihaposeos.

Vaarallisten aineiden luokitusta ja merkintöjä koskevassa neuvoston direktiivissä lyijy ja lyijy-yhdisteet luokitellaan seuraavasti /3/:

- terveydelle haitallista hengitettynä ja nieltynä,
- terveydellisten haittojen vaara pitkäaikaisessa altistuksessa sekä
- vaarallista sikiölle ja hedelmällisyydelle.

Lyijy aiheuttaa vahinkoa ihmisen keskus- ja ääreishermostoon, verenkiertoon ja munuaisiin. Lisäksi lyijy aiheuttaa erityistä terveydellistä haittaa raskaana oleville naisille, sikiöille ja alle 6-vuotiaille lapsille /3/, /38/.

4.1.3 Elohopea

SE-laitteissa elohopeaa esiintyy pääasiassa termostaateissa, antureissa, releissä, katkaisijoissa, loisteputkilampuissa, teleteknisissä laitteissa ja paristoissa /3/, /48/. Elohopea on toisaalta erittäin energiatehokas materiaali, joten sen käytön lopettaminen saattaisi lisätä SE-laitteiden energiankulutusta.

Vaarallisten aineiden luokitusta ja merkintöjä koskevassa neuvoston direktiivissä elohopea ja elohopeayhdisteet luokitellaan seuraavasti /3/:

- myrkyllistä hengitettynä, joutuessaan iholle ja nieltynä sekä
- terveydellisten haittojen vaara pitkäaikaisessa altistuksessa.

Elohopea vaikuttaa ihmisessä aivoihin, erityisesti näköä, koordinaatiota ja tasapainoa sääteleviin aivojen osiin /3/, /38/.

4.1.4 Kuudenarvoinen kromi

Kuudenarvoista kromia käytetään SE-laitteiden teräskoteloiden korroosiosuojaukseen ja lujuuden parantamiseen. Kromiyhdisteitä käytetään mm. värien valmistamiseen ja alumiinin, sinkin, teräksen ja magnesiumin pinnoittamiseen /3/, /48/. Tuotteissa kromi esiintyy metallisena, ei kuudenarvoisena.

Vaarallisten aineiden luokitusta ja merkintöjä koskevassa neuvoston direktiivissä kromi VI ja sen yhdisteet luokitellaan seuraavasti /3/:

- syöpää aiheuttava,
- pitkäaikaiset haittavaikutukset vesiympäristössä sekä
- ihokosketus aiheuttaa herkistymistä

Kromi VI läpäisee helposti solukalvot aiheuttaen voimakkaita allergisia reaktioita sekä mahdollisesti astmaattisen keuhkoputkentulehduksen. Kromi VI:n on arveltu myös aiheuttavan vaurioita DNA:han /38/.

4.1.5 Bromatut palonestoaineet

Direktiiveissä mainitaan kaksi bromattua palonestoainetta, PBB- ja PBDE-yhdisteet, joiden käyttöä halutaan rajoittaa. SE-laitteissa bromattuja palonestoaineita käytetään painetuissa piirilevyissä, liittimissä, muovikoteloissa (televisiot, tietokoneet, puhelimet) ja kaapeleissa. Arvion mukaan n. 78% jätteen sisältämistä bromatuista palonestoaineista on peräisin SER:sta /3/, /48/.

PBDE:t ovat eniten käytettyjä bromattuja palonestoaineita. Niitä käytetään lähes kaikissa polymeereissä, joissa halutaan vähentää tulenarkuutta. PBDE:t eivät reagoi kanta-aineen kanssa kemiallisesti. PBDE:n etuina ovat runsas bromisisältö, terminen stabiilius, soveltuvuus ja halpuus.

PBB:t ovat pysyviä ja rasvaliukoisina eivät liukene veteen. PBB:n vahvuutena paloneston kannalta on korkea bromipitoisuus. Korkeasta hinnasta johtuen PBB:n käyttö rajoittuu erikoistarkoituksiin, kuten rakennemuoveihin.

Bromatut palonestoaineet vaikuttavat haitallisesti maksan ja kilpirauhasen toimintaan /38/.

4.2 RAUTA

Rauta esiintyy SE-laitteissa yleensä teräksen muodossa. Yleisimmät käyttökohteet ovat kylmälaitteissa, pesukoneissa ja tietokoneiden rungoissa sekä kylmälaitteiden kompressoreissa. SE-laitteissa yleisimmin käytetyt teräkset ovat joko pinnoitettuja rakenneteräksiä tai austeniittisia ruostumattomia teräksiä. Rakenneteräs pinnoitetaan sähkösinkityksen avulla, jolloin teräkseen saadaan riittävä korroosionkestävyys. Ruostumattomien terästen korroosionesto on saatu aikaan kromiseostuksella.

Valmistettaessa terästä rautamalmista energiankulutus on noin 20 GJ/tn kun taas romuraudasta valmistettu teräs kuluttaa energiaa noin 2 GJ/tn. Kierrätettäessä kulutetaan myös 90% vähemmän raaka-aineita ja 40% vähemmän vettä. Sekä ruostumattomat että rakenneteräkset ovat helposti kierrätettävissä.

4.3 KUPARI

Kuparia käytetään SE-laitteissa hyvän johtavuutensa ansiosta. Siten se on esimerkiksi kaapeleissa tärkein materiaali. Kupari on yleinen raaka-aine lisäksi piirikorteissa sekä monissa elektronisissa rakenneaineissa. Yli 50 % tuotetusta kuparista käytetään

erilaisissa sähköjohteissa. Kuparin osuus on lähes kaksi kolmasosaa SE-laitteissa käytettävistä ei-magneettisista metalleista.

Kuparin suurimmat ympäristöhaitat aiheutuvat malmin käsittelystä ja jalostamisesta. Primäärikuparin tuotanto aiheuttaa rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöjä. Primäärikuparin valmistus kuluttaa energiaa noin 35-55 GJ/tn kun taas sekundäärisen kuparin valmistus 5-45 GJ/tn /12/. Alumiinin luvut 94 GJ/tn ja 5 GJ/tn. Kuparin kierrätysaste on noin 40%.

4.4 MUOVIT

SER sisältää erilaisia muoveja n. 20%. Muoveja käytetään SE-laitteissa, koska ne ovat kestäviä, kevyitä, monikäyttöisiä, halpoja, korroosion- ja lämmönkestäviä sekä omaavat erinomaiset eristysominaisuudet. Eniten muovia käytetään televisioiden ja tietokoneiden koteloissa. Useimmat polymeerit eivät ole yksinään käyttökelpoisia käytännön sovelluksissa, joten niihin sekoitetaan lisäaineita ja komponentteja (maalit, pinnoitteet, vaahdot), jotka vaikeuttavat kierrätystä.

Hankalimpia muoveja kierrätyksen kannalta ovat palonestoaineita sisältävät muovit, koska ne vaikeuttavat käytöstä poistettavien muovituotteiden tunnistusta, lajittelua ja kierrätystä. Noin 10-15% SER:n muovisisällöstä on tällä hetkellä käsitelty halogenoiduilla palonestoaineilla /29/.

Muita ongelma-alueita muovin hyötykäytön kannalta ovat tunnistuksen ja lajittelun vaikeus, useiden muovilaatujen käyttö sekä kierrätetyn muovin markkinoiden puuttuminen.

Kehitteillä on tehokkaampia menetelmiä, joiden avulla pystytään arvioimaan, mitä lisäaineita muovissa on. Tämä tieto helpottaisi huomattavasti kerättävän muovin käsittelymahdollisuuksia. Eräs menetelmä, jolla on hyviä tuloksia, on TXFR (Total-reflection X-ray Analysis) /7/. TXFR perustuu röntgensäteiden fluoresenssin

mittaamiseen niiden heijastuessa väliaineen pinnalta. Muovien tunnisteena tulisi käyttää lasermerkintää kierrätystä haittaavien tarrojen sijasta.

SE-laitteissa tulisi käyttää myös mahdollisimman vähän erilaisia muovilaatuja, ideaalitulanteessa laitteessa olisi vain yhtä polymeeriä. Kierrätys on luonnollisesti helpompaa, mikäli eri muovilaatuja ei tarvitse erottaa toisistaan. Kierrätetyille muoville ei ole myöskään syntynyt kovin suuria markkinoita, koska kierrätysprosessissa muovin ominaisuudet muuttuvat eivätkä muovit enää sovellu alkuperäiseen tarkoitukseen. Myös primäärimuovin edullisuus vaikeuttaa muovin uusiokäyttöä.

Vuonna 2000 käytetyimpiä muoveja SE-laitteissa olivat PVC (polyvinyylikloridi) 4%, PC (polykarbonaatti) 5%, PU (polyuretaani) 8%, PC/ABS-yhdiste 16%, PP (polypropeeni) 18%, PS (polystyreeni) 18%, ABS (akryliniitriilibutadieeni-styreeni) 30% /6/, /20/. Prosenttiluku kuvaa kyseisen muovin osuutta kaikista SE-laitteista. ABS:n käyttö on nykyään suosituinta, mutta vanhoissa SE-laitteissa - eli niissä, jotka nykyään tulevat kierrätykseen - on runsaasti PVC:tä.

Esikäsittelyssä syntyvä jäte sisältää suuria määriä erilaisia muoveja. Muovin esikäsittelyssä mekaanista erottelua käytetään lähinnä lajitellulle homogeeniselle muovijätteelle. Kemiallinen käsittely eli muovin purkaminen takaisin peruskemikaaleiksi edellyttää suurta volyymiä, minkä vuoksi menetelmä ei ole yleistynyt, vaikka se saattaisi olla järkevin vaihtoehto muovin kierrätysvaihtoehtoista /45/. Muovin energiana hyödyntäminen (polttamalla) on sekamuovin osalta usein ainoa järkevä käsittelytapa. Muovien sisältämät lisäaineet kuitenkin rajoittavat polttamista, joten useimmiten muovit sijoitetaan valvotuille kaatopaikoille.

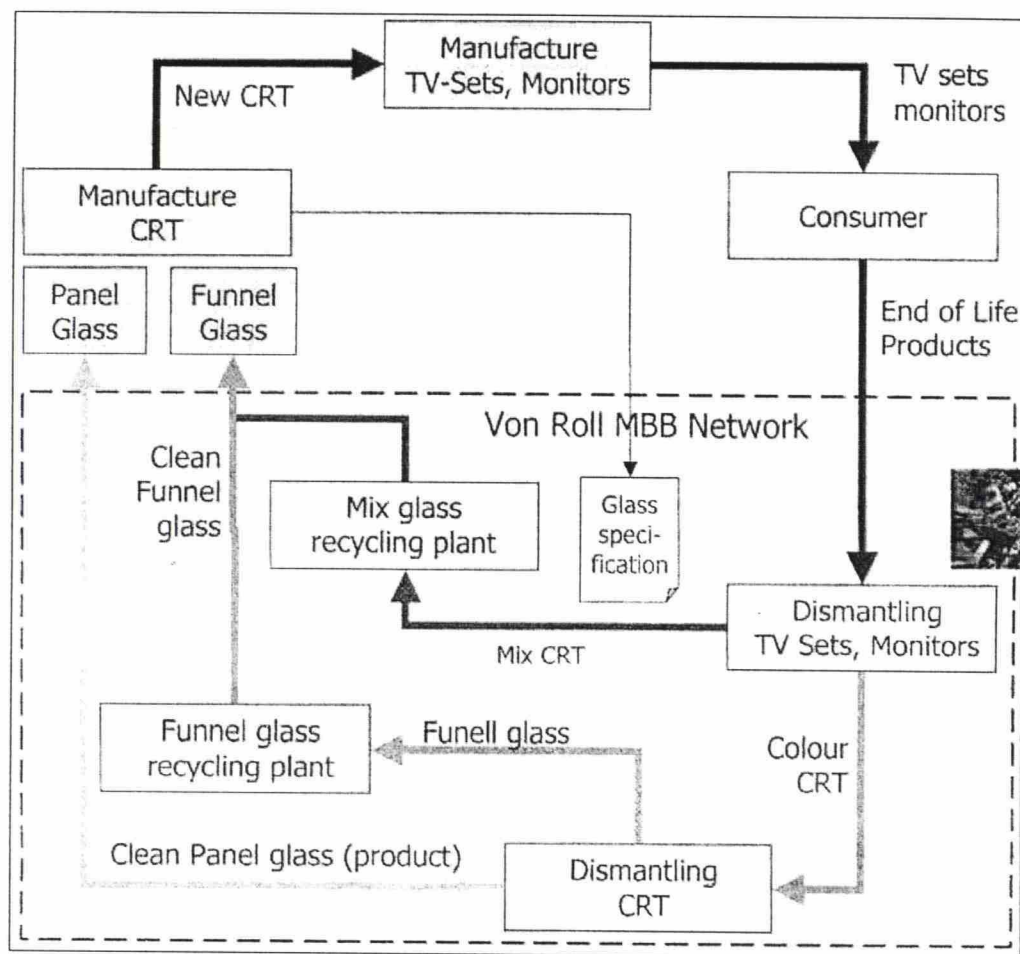
Kestomuovit ovat teoriassa kierrätettäviä, tosin useat muovien prosessointiin erikoistuneet käsittelijät eivät käsittele SE-laitteista peräisin olevia muoveja. Tämä johtuu taloudellisista ja logistisista syistä: muovien materiaalikierrätyksen lisääminen edellyttäisi keräilyn, erottelun, tunnistamisen, seostamisen, hyödyntämisen ja

kierrätysmuovista valmistettujen tuotteiden kehittämistä. Vuonna 1999 Euroopassa SE-laitteiden muovista 96 % päätyi kaatopaikalle tai polttoon /6/. Kierrätettävät muovit ovat esim. Siemensin omalla käsittelylaitoksella ABS- ja PC-muoveja /17/.

4.5 LASI

SE-laitteissa lasia on lähinnä televisioiden ja tietokoneiden kuvaputkissa ja ruuduissa. Kuvaputkilasi sisältää mm. paljon lyijyä, minkä vuoksi se luokitellaan ongelmajätteeksi. Lyijypitoinen lasi kierrätetään yleensä kuvaputkitehtaille uusien laitteiden tuotantoprosessiin ulkomaille. Kuvaputkesta saadaan kuitenkin erotettua myös lyijyvapaa lasijae, joka voidaan kierrättää helpommin. Hyötykäyttöä vaikeuttaa kuitenkin kuvaruutulasissa oleva bariumoksidi. Lasimurska on yleensä hyvin sopivaa kierrätykseen.

Saksalainen kierrätysyritys von Roll MBB pyrkii kierrättämään kuvaputkilasin kokonaan (Kuva 15).



Kuva 15. von Roll MBB:n kuvaputken kierrätysprosessi /37/.

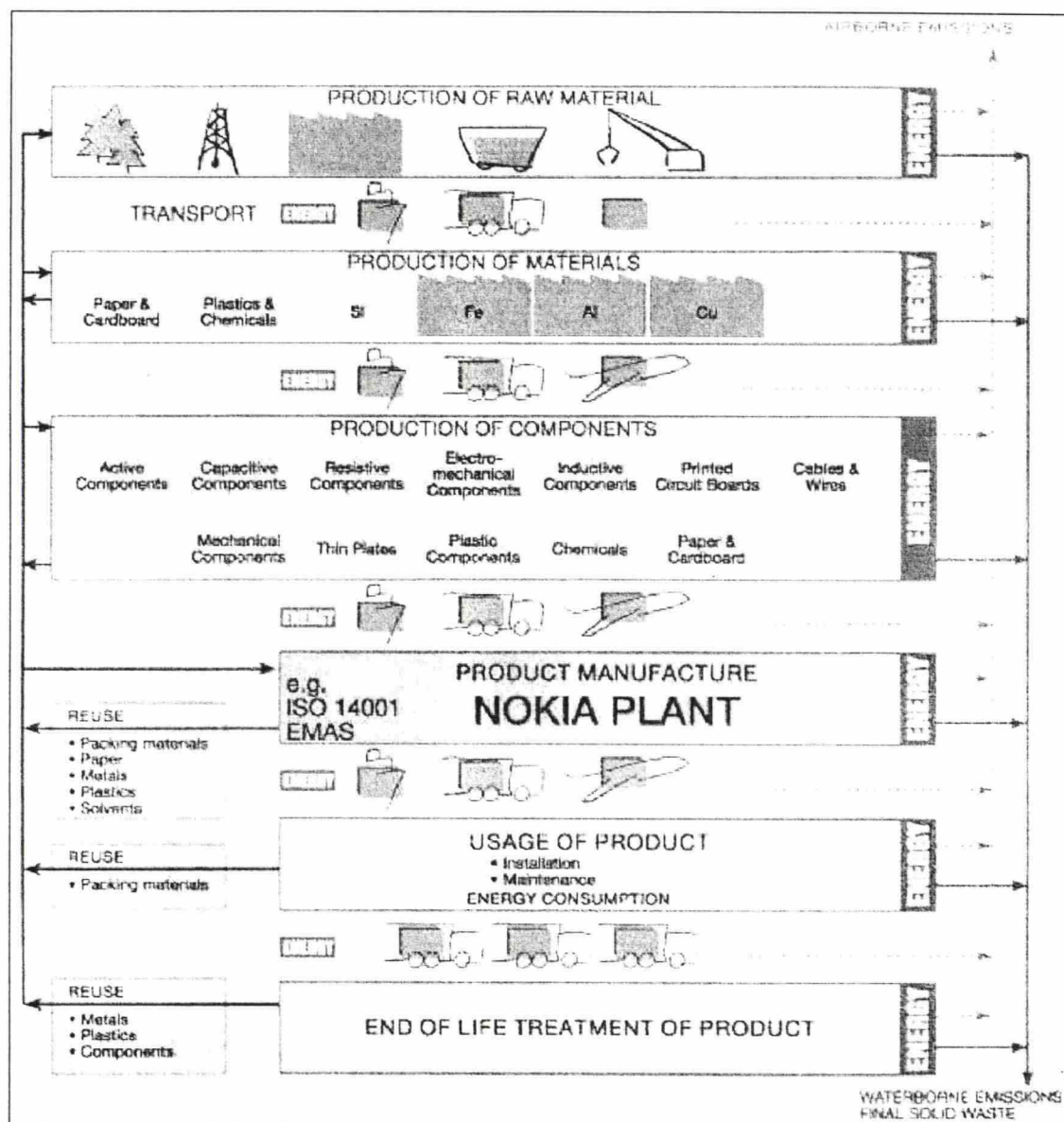
4.6 JALOMETALLIT

Jalometalleja (kulta, hopea, palladium) käytetään SE-laitteissa yleensä pinnoitettaessa liittimiä, kytkimiä tai releitä. 1970-luvulla jalometallien osuus SE-laitteissa oli suuri. Jalometallien osuus SE-laitteissa on kuitenkin vähenemään päin, mikä aiheuttaa SER:n kierrätyksen kannattavuudelle uusia haasteita tulevaisuudessa /45/. Esim. kultaiset liitinjohdot tullaan mahdollisesti korvaamaan alumiinilla ja liittimien pinnoituksissa käytettävä kultakerros tulee tekniikan kehittyessä aina vain ohuemmaksi.

5 CASE: MATKAPUHELIMEN MATERIAALIT JA KIERRÄTYS

Tarkasteltaessa matkapuhelimen materiaaleja sekä mahdollista tulevaa kehitystä ympäristön kannalta, järkevintä on käyttää apuvälineenä elinkaarianalyysiä. Tässä tapauksessa keskitytään tarkastelemaan pääasiassa tuotesuunnittelun näkökulmasta, miten eri materiaalit ja niiden mahdollinen lisäys/vähennys vaikuttavat matkapuhelimen ympäristökuormitukseen koko elinkaaren vaiheissa. Tarkastelua vaikeuttaa huomattavasti teollisuudenalan dynaamisuus: tuotteiden jatkuva kehittyminen, käyttöiän lyheneminen ja kasvavat markkinat ovat vaikeasti arvioitavia muuttujia.

Ympäristömyönteisessä tuotesuunnittelussa materiaalivirtoja voidaan tarkastella kahdesta eri näkökulmasta: määrällisestä ja laadullisesta. Määrällinen näkökulma perustuu esim. materiaalien ja energian kulutuksen minimointiin ja tuotteiden käyttöiän pidentämiseen. Laadullinen näkökulma ottaa huomioon panosten (materiaalit ja energia) ja päästöjen (tuotanto, käyttö, kierrätys) laadun. Tällöin pyritään valitsemaan tuotteeseen materiaaleja, jotka ovat ihmiselle ja ympäristölle mahdollisimman haitattomia, kun huomioidaan tuotteen koko elinkaari.



Kuva 16. Matkapuhelimen elinkaari ja ympäristövaikutukset /52/.

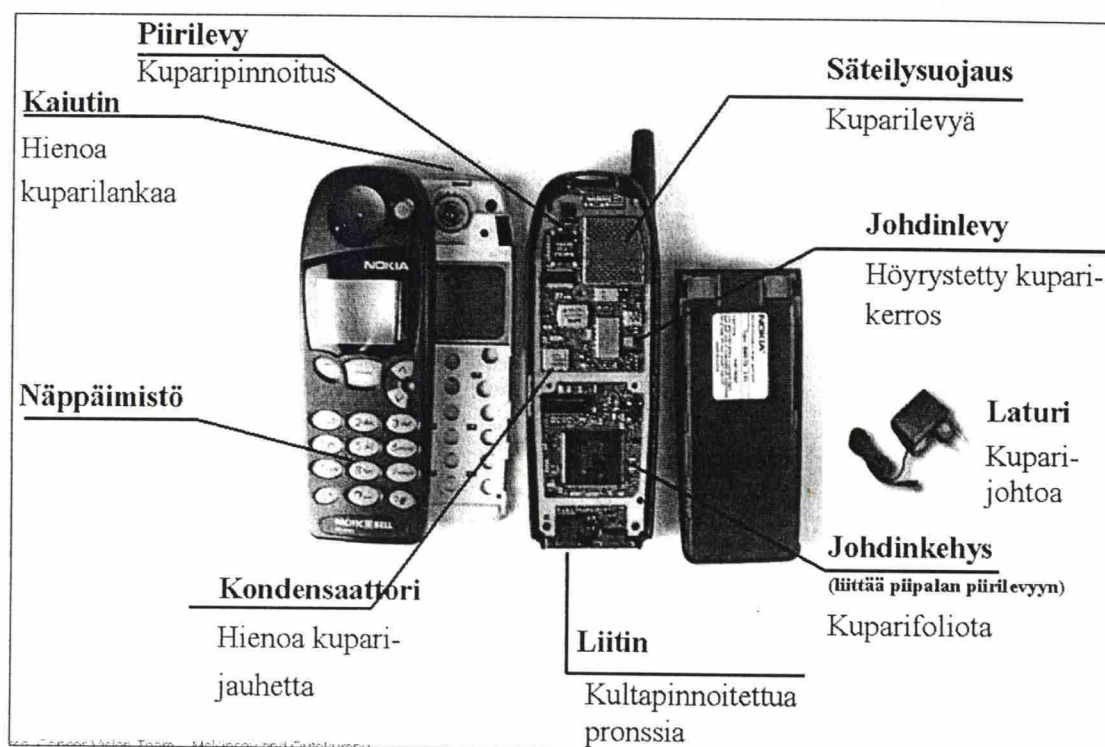
Matkapuhelimen elinkaarta (Kuva 16) tarkasteltaessa ympäristövaikutukset (energiankulutus, palvelut, päästöt) jakautuvat pääasiassa tuotantoon liittyviin vaikutuksiin (70%) ja käytön aikaisiin vaikutuksiin (25%). Matkapuhelin sisältää lukuisia eri määriä materiaaleja, joiden tuottaminen rasittaa ympäristöä. Keskeisimmät materiaalit, niiden osuudet ja käyttökohteet ovat (Nokia 6110) /47/:

- ABS-PC-muovi, 29 %, kuori,
- keraamit, 16 %, piirilevyn komponenteissa,
- kupari ja sen yhdisteet, 15 %, piirilevyssä johteena ja pinnoitteena, liittimet (TiCu, BeCu), antennissa,
- silikonimuovi, 10 %, näppäimistössä, näytössä, tiivisteissä,
- epoksi, 9 %, piirilevyssä,
- muut muovit, 8 %, näytössä sekä
- Fe, 3 %, ruuveissa.

Lisäksi esiintyy noin prosentin osuuksia Sn-Pb-yhdisteinä (juotteet), Br-yhdisteinä (palonestomateriaali), Ni-yhdisteinä (piirilevy) Zn-yhdisteinä (piirilevy). Muita tärkeitä materiaaleja kierrätyksen kannalta ovat Ag (seosaineena johtavissa liimoissa), Au (pinnoitteena) ja Pd (piirilevy).

Nokia 6110 on ns. peruspuhelin, jossa on metallipitoisuus n. 22 %. Yleisesti ottaen Nokian malleista voisi sanoa, että metallipitoisuus kasvaa kalliimmissa puhelimissa. Tällöin muita käytettyjä metalleja ovat teräs, alumiini, magnesium ja titaani.

Yleisimmän metallin, kuparin, käyttökohteita matkapuhelimessa on useita (Kuva 17).



Kuva 17. Kuparin käyttö matkapuhelimessa /53/.

5.1 MATKAPUHELIMEN MATERIAALISISÄLLÖN MUUTTAMISEN VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖÖN KOKO ELINKAAREN AIKANA

Ympäristövaikutusten elinkaaritarkastelulla tarkoitetaan pyrkimystä tunnistaa tärkeimmät tuotteen aiheuttamat ympäristöhaitat sen koko elinkaaren aikana. Tavoitteena on saada kokonaiskuva siitä, onko jonkin ominaisuuden muuttaminen, esimerkiksi materiaalin vaihtaminen, kokonaisuuden kannalta järkevää.

Oletetaan, että matkapuhelimen muoviosia halutaan korvata metallilla ja tarkastellaan, mitkä olisivat muutoksen vaikutukset ympäristöön koko elinkaaren aikana. Tarkastellaan materiaalin vaihtamista myös muista näkökulmista, kuten taloudellisesta ja lainsäädännöllisestä kannalta.

5.1.1 Elinkaaren aikana tapahtuvat ympäristövaikutukset

Tuotteen ympäristövaikutuksia elinkaaren aikana voidaan arvioida esimerkiksi erilaisten matriisien tai tarkistuslistojen avulla, missä on lueteltu ympäristöön vaikuttavia tekijöitä /2/.

Matriisianalyysissä ympäristövaikutukset jaetaan kolmeen ryhmään: materiaalien käyttö, energiankulutus sekä ympäristölle ja ihmisille haitalliset päästöt. Materiaalin käytön tarkasteluun sisältyy mm. raaka-aineiden niukkuus ja uusiutumiskyky, maaperän köyhtyminen, materiaalien uudelleenkäyttö, kierrätys, kierrätettyjen materiaalien käyttö, tuotteen käyttöikä ja materiaalin määrä. Energiankulutukseen liittyen arvioidaan materiaalin valmistuksen, tuotantoprosessien ja käytön aikaista energiankulutusta. Päästöjen kohdalla voidaan listata elinkaaren eri vaiheissa syntyvät myrkylliset päästöt. Tämän jälkeen näitä kolmea vaikutusta tarkastellaan tuotteen eri elinkaaren vaiheissa. Matriisi voidaan tämän jälkeen muodostaa esimerkiksi matkapuhelimelle (Taulukko 8).

Taulukko 8. Esimerkki ympäristövaikutusten arvioinnista matkapuhelimelle

	Materiaalien käyttö	Energian-kulutus	Päästöt
Valmistus	raaka-aineiden kulutus tuotantojätteen kierrätys	materiaalien energiasisältö prosesseissa kuluva energia	päästöt ilmaan päästöt veteen
Käyttö	vaihtokuoret	akut	säteily
Käytöstä poisto	kierrätys	kuljetus, esi-käsittely, erotus-prosessit	muovin poltto

Tarkasteltaessa materiaalivalintoja ja niiden vaikutusta ympäristöön tarkistuslistojen avulla täytyy huomioida ainakin seuraavat arviointikohteet:

- kemialliset yhdisteet ja kemikaalit,
- kuluvat osat,

- huoltojärjestelmä,
- valmistusprosessin eri vaiheiden kuluttama energian ja palveluiden määrä,
- valmistuksen päästöt,
- valmistuksessa käytettävät materiaalit ja niiden kierrätettävyys sekä
- energiankulutus käytön aikana

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan matkapuhelimen ympäristövaikutuksia sekä matriisianalyysin, että tarkistuslistan avulla.

5.1.1.1 Valmistus- ja suunnittelunäkökohdat

Materiaalien valmistus on suurin yksittäinen ympäristön kuormittaja matkapuhelimilla. Näin ollen sillä on suurin painoarvo myös elinkaarianalyysissä.

Valmistusprosessin kannalta tulisi tutkia eri vaiheiden kuluttama energian ja palveluiden määrä sekä valmistuksen päästöt ja mahdollisuudet niiden vähentämiseen. Voidaan todeta, että muovin valmistukseen kuluva energiamäärä on tonnia kohden suurempi kuin metallien valmistukseen tarvittava. Muoviteollisuuden päästöt ovat myös suuremmat kuin metalliteollisuuden, joten muovien valmistus rasittaa enemmän ympäristöä kuin metallin, joten tältä kannalta metallien käyttö on perusteltua (Taulukko 9). Oheisen taulukon lukuarvot on saatu yhdestä elinkaaritarkastelusta. Lukuisissa lähteissä on erittäin paljon hajontaa lukuarvoissa.

Taulukko 9. Kuparin, ABS- ja PC-muovin valmistuksen ympäristövaikutukset /51/.

	Energiankulutus	Päästöt ilmaan							
	(MJ/tn)	CO2	CO	NOx	SO2	CxHy	CH4	hiukkaset	raskasmetallit
Cu	35,7	2,8	6	6,2	5,5	0,6	0,6	7	*
ABS	95	3,1	3,8	11	10	14,1	10	2,9	5
PC	116,8	5	3,6	19	12	23,1	18	6,7	4

Taulukko ei kuitenkaan kerro koko totuutta, koska kuparin ominaispaino on muovia huomattavasti suurempi. Samankokoinen kupariosa painaa siis enemmän kuin vastaava muovinen, joten kuparia tarvitaan enemmän. Tuotekehityksen kautta tulisikin kehittää esim. ohuempia kuoriratkaisuja, jotta puhelimen kokonaispaino ei myöskään kasvaisi kuluttajan kannalta epäedulliseksi.

Ympäristömyönteisessä tuotesuunnittelussa voidaan myös vaikuttaa materiaalin valintaan. Tällöin huomioon otettavia asioita ovat materiaalien määrä (metallien käyttö muovin asemesta saattaa lisätä materiaalin tarvetta), vaarallisten aineiden minimointi (metalleissa ei tarvitse käyttää palonestoaineita, kuten muoveissa) sekä pitkäikäisyyden kehittäminen (matkapuhelimessa materiaalivalinta ei ole olennaisessa osassa käyttöikää tarkasteltaessa, mikäli muodin vaihteluita ei oteta lukuun).

5.1.1.2 Käytönaikaiset näkökohdat

Tuotannon jälkeen matkapuhelimen elinkaareissa ympäristöön eniten vaikuttaa käytönaikaiset toiminnot, pääasiassa energiankulutus (akun lataaminen). Metallin korvaaminen muovilla ei vähennä matkapuhelimen energiankulutusta.

Muita käytönaikaisia näkökohtia, jotka eivät liity ympäristöön, voisivat olla asiakkaan tarpeet (laatu, hinta, toiminnot, muoti). Matkapuhelimen tärkeimmät ostoperusteet ovat hinta ja toiminnot. Tätä taustaa vasten tarkasteltuna metallien käytön lisääminen puhelimissa ei edesauta myyntiä; metallin osuuden kasvaessa puhelimen hinta kasvaa, koska metallit ovat muoveja kalliimpia tuottaa. Metallin lisäämisellä ei saada puhelimeen myöskään parempia toimintoja.

Tulevaisuudessa, kun esim. säteilyn vaikutuksesta saadaan lisätietoa, voidaan arvioida, estäisikö metallinen kuori paremmin säteilyä. Tuoreessa Säteilyturvakeskuksen tutkimuksessa matkapuhelimen säteilyn on todettu vaikuttavan solujen proteiinintuotantoon. Mikäli metallikuori estäisi säteilyä tehokkaammin, olisi sen käyttö perusteltua.

Näiden lisäksi voidaan vielä tarkastella muovin ja metallin teknisiä ominaisuuksia, kuten ominaispainoa ja lämmönjohtavuutta, jotka voivat vaikuttaa käyttömukavuuteen. Kuluttajat yleisesti arvostavat kevyempää puhelinta, mikä puoltaa muovien käyttöä. Käytettäessä metallia esim. kuoressa saattaa puhelin kuumeta, mikä ei ole käyttäjän kannalta hyvä asia.

Matkapuhelimen ostoperusteena saattavat olla myös muoti-ilmiöt. Asiakkaiden mieltymysten muuttuminen/muuttaminen puhuu metallin käytön lisäämisen puolesta: ”muovikuoret ovat vanhanaikaisia, metallit nykyaikaisia ja tyylikkäitä”.

5.1.1.3 Käytönjälkeiset näkökohdat

Käytönjälkeiset toiminnot aiheuttavat matkapuhelimen elinkaareissa ympäristöön pienimmät vaikutukset (alle 5 %). Tarkemmin tarkasteltuna oikealla käytönjälkeisellä strategialla saavutetaan ympäristön kannalta positiivinen ympäristövaikutus: kierrätetty materiaali vähentää primäärisen raaka-aineen tarvetta. Niinpä esimerkiksi matkapuhelimien tapauksessa, missä tuotannon ympäristövaikutukset ovat suuret, voidaan tehokkaalla kierrätyksellä pienentää huomattavasti koko elinkaaren aikana aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Ruotsissa ja Iso-Britanniassa tehdyssä matkapuhelimien keräyksen ja kierrätyksen pilottitutkimuksessa todettiin, että matkapuhelimen keräyksen ja prosessoinnin aiheuttamat ympäristövaikutukset ovat äärimmäisen pieniä verrattuna siihen, kuinka paljon vältetään tuotannon aiheuttamissa ympäristövaikutuksissa /49/.

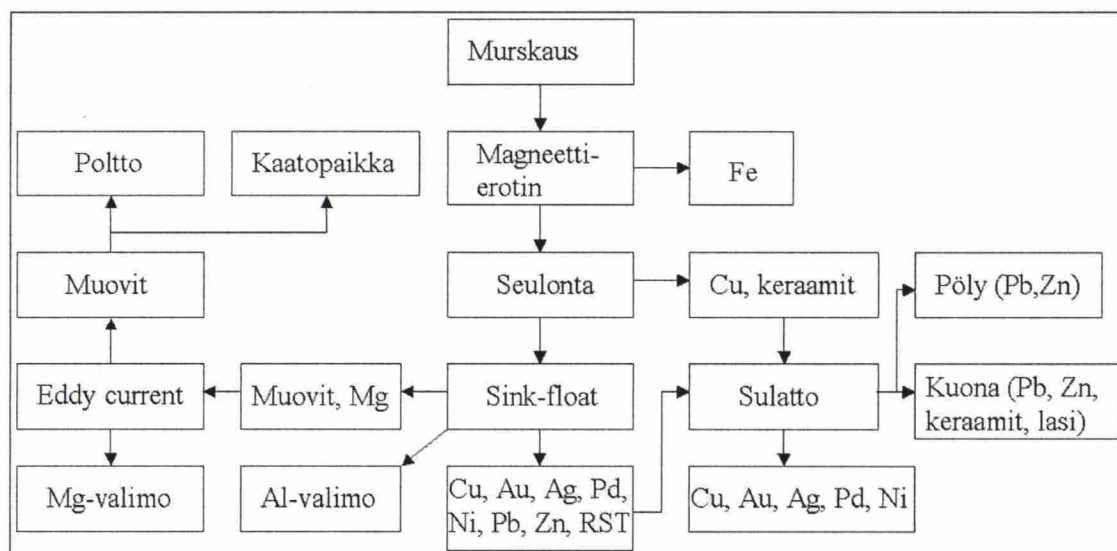
Samassa tutkimuksessa todettiin myös, että matkapuhelimia tuodaan melko harvoin kierrätykseen. Tutkimuksessa tiedusteltiin, mitä kuluttajat ovat tehneet käytöstä poistamalleen matkapuhelimelle. Noin 50 %:lla vastaajista oli puhelin vielä itsellään, ja 30 % oli joko myynyt tai lahjoittanut puhelimen /49/.

Jos ajatellaan metallien käyttöä muovin sijasta matkapuhelimissa, ovat käytönjälkeiset toiminnot ympäristön kannalta edullisempia käytettäessä metallia. Metallit saadaan talteen kierrätyksessä helposti, koska tekniikka on tunnettua. Lisäksi metallien kierrätettävyyys uusiin tuotteisiin on helppoa, koska metallien ominaisuudet eivät muutu kierrätysprosesseissa. Sen sijaan matkapuhelimen muoviosia (pääasiassa kuorta) ei voida kierrättää juuri ollenkaan. Muovit muuttavat kierrätysprosessissa ominaisuuksiaan, minkä vuoksi ne eivät sovellu alkuperäiseen tarkoitukseen. Tosin esim. Motorolalla on puhelinprototyyppi, jossa kuori on kierrätettyä muovia. Kierrätetyille muoville on olemassa tällä hetkellä erittäin pienet markkinat. Energiana hyödyntämistä (polttaminen) taas vaikeuttaa muovien sisältämät palonestoaineet. Tarkkoja lukuja on vaikea antaa, kuinka paljon muovien korvaaminen metallilla helpottaisi ympäristökuormitusta tässä elinkaaren vaiheessa.

Matkapuhelimien materiaaleissa on menossa kehitys, missä arvokkaita materiaaleja käytetään entistä vähemmän. Tämä vaikeuttaa myös tuotteen kierrätystä: mikäli puhelimesta saatavien materiaalien arvo pienenee, ei käytetty matkapuhelin ole enää kierrätysyrityksille niin arvokas raaka-ainelähde. Metallien lisääminen puhelimissa kasvattaisi matkapuhelimen käytönjälkeistä arvoa, mikä todennäköisesti parantaisi myös kierrätystä ja talteenottoa.

5.1.1.4 Matkapuhelimen käytönjälkeiset materiaalivirrat

Matkapuhelimen poistuttua käytöstä se ohjataan kierrätykseen. Matkapuhelin on arvokas sekundäärinen raaka-aineen lähde, koska se sisältää mm. jalometalleja. Matkapuhelimen materiaalikoostumuksen perusteella voidaan laatia käytönjälkeinen materiaalivirta-analyysi (Kuva 18).



Kuva 18. Matkapuhelimen käytönjälkeiset materiaa livirrat /9/, /10/.

Matkapuhelin voidaan ennen murskausta esikäsitellä, mikäli se on taloudellisesti järkevää. Järkeväksi esikäsittelyn tekee helposti irrotettavat jalometalleja sisältävät osat. Matkapuhelin sisältää harvoin sellaisia komponentteja, jotka pitäisi poistaa esikäsitelyssä. Tämän vuoksi on usein järkevää syöttää matkapuhelin (ilman akkua) suoraan murskaimeen.

Murskauksen jälkeen erotetaan magneettierottimella rautapitoinen jae, joka sisältää pääasiassa ruuveja. Ei-magneettipitoinen jae seulotaan, jossa saadaan talteen hienojakoinen kuparipitoinen jae. Tässä hienossa jakeessa on pääasiassa piirikortissa olevia ohuita kuparilankoja. Lisäksi jae sisältää hienoksi jauhuneita lasi- ja keraamiosia puhelimen näytöstä ja piirikortista. Seulonnan alite ohjataan kuparisulattoon edelleen rikastettavaksi. Keraamiosat joutuvat sulatusprosessissa kuonaan ja kupari saadaan talteen raaka-aineena.

Seulonnan ylite johdetaan sink-float prosessiin. Ylitteeseen saadaan kevyet muoviosat, kuten ABS-PC, epoksi ja silikonimuovit. Talteen saatu muovi ohjataan joko polttolaitokseen tai kaatopaikalle. Puhelimessa mahdollisesti oleva magnesium saadaan

myös talteen sink-float-prosessin ylitteeseen ja magnesium voidaan erottaa muovista esim. eddy-current -menetelmällä. Magnesium päätyy teollisuuden raaka-aineeksi.

Sink-float-prosessin alite sisältää pääasiassa metalleja, joista keskeisimmät ovat kupari, kulta, hopea, palladium, nikkeli, lyijy ja sinkki. Tämä jae prosessoidaan kuparisulatossa, missä sulaan saadaan talteen kupari, nikkeli ja jalometallit. Sinkki ja lyijy jakautuvat prosessiolosuhteista riippuen kuonaan ja pölyyn. Kupari ja jalometallit saadaan jalostettua kuparielektrolyysissä, nikkeli ohjataan sakkana nikkelin tai nikkelisuolojen valmistukseen.

5.1.2 Lainsäädännölliset näkökohdat

EU:n ehdottamat direktiivit vaikuttavat luonnollisesti myös matkapuhelimen materiaalivalintoihin. Direktiivin hengen mukaisesti kierrätyksen edistäminen on yksi päätavoite. Metallien käytön lisääminen tuotteissa on hyvä keino tämän tavoitteen saavuttamiseen.

Jäsenvaltioiden tulisi kansallisella lainsäädännöllä kannustaa tuottajia kierrätysmyötäiseen tuotesuunnitteluun sekä lisäämään kierrätetyn materiaalin osuutta SE-laitteiden valmistuksessa. Matkapuhelimen tulee direktiivin mukaan sisältää hyödynnettävää materiaalia 85 % ja kierrätettävää materiaalia 70 %. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että muovista voi olla puhelimesta n. 35 % (5 % muovista tulee kierrättää). Muovista polttamalla saatava energia lasketaan materiaalin hyödyntämiseksi. Metallin käyttö puhelimissa helpottaa kierrätystavoitteiden saavuttamista. Mikäli kierrätettävän materiaalin %-osuus tulevaisuudessa nousee, tarkoittaa se välttämättä sitä, että muoville tulee löytää uusiokäyttömahdollisuuksia tai metallin osuutta puhelimesta tulee lisätä.

Direktiivin tavoitteena on myös kaatopaikkauksen vähentäminen. Tällä hetkellä SER:n muovit kaatopaikataan monessa kierrätysyrityksessä, koska niiden energiaa ei pystytä hyödyntämään polttamalla johtuen syntyvistä päästöistä. Metallin korvaaminen muovilla vähentäisi kaatopaikkauksen tarvetta.

Vaarallisia aineita koskeva direktiivi vaikuttaa matkapuhelimen materiaaleihin pääasiassa bromattujen palonestoaineiden käytön kieltämisellä. Tämä luonnollisesti puoltaisi muovien korvaamista metalleilla, mutta toisaalta markkinoilla on saatavilla myös muunlaisia palonestoaineita, joita ei ole direktiivissä kielletty. Lisäksi piirilevyn juotteissa esiintyy lyijyä, joka tulee korvata muilla materiaaleilla.

6 YHTEENVETO

EU:n jäsenmaissa astunee voimaan vuoden 2002 aikana direktiivit, jotka koskevat sähkö- ja elektroniikkaromun jätehuollon järjestämistä sekä tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamista. EU:n parlamentti on hyväksynyt direktiivit huhtikuussa 2002.

Keskeisinä lähtökohtina direktiivien syntymiselle olivat

- tuottajan vastuu (SE-laitteiden valmistajat asetetaan fyysiseen ja taloudelliseen vastuuseen jätehuollosta. Tuottajilla on paras mahdollisuus vaikuttaa laitteiden kierrätettävyyteen mm. tuotesuunnittelun avulla),
- SER:n määrän lisääntyminen (SER :n määrä lisääntyy kovaa vauhtia, koska elektroniikkalaitteet ovat yleistyneet niin teollisuudessa kuin kotitalouksissa sekä tuotteiden elinikä on lyhentynyt),
- SER:n huollon nykytilanne (SER:n kierrätys on suhteellisen uusi teollisuudenala, joten myös siksi lainsäädäntö on paikallaan. Nykytilanteen suurimpia haasteita ovat kaatopaikkojen rajallinen kapasiteetti, SER:n muoviosien polttaminen, kierrätetyn materiaalin alhainen kysyntä, puutteelliset keräysjärjestelmät ja riittämättömät investoinnit tutkimukseen ja kehitykseen),
- erilaiset lainsäädännöt jäsenvaltioissa (direktiivien avulla pyritään yhtenäistämään jäsenvaltioiden lainsäädäntöä) sekä
- SE-laitteissa esiintyvät vaaralliset aineet.

Direktiiveissä on määrätty SER:n osalta keskeiset tavoitteet, soveltamisala, määritelmät, erillisen keräyksen järjestäminen, laitteiden esikäsittely, materiaalien hyödyntäminen, rahoitus ja tiedotus.

Uusi lainsäädäntö vaikuttaa SE-laitteiden tuottajiin siten, että tuottajat joutuvat entistä tarkemmin ottamaan huomioon ympäristönäkökohdat omissa tuotteissaan. Ympäristövaikutusten arviointiin hyvä apuväline on elinkaarianalyysi.

Elinkaarianalyysissä arvioidaan yhden tuotteen ympäristövaikutuksia sen koko elinkaaren aikana. Elinkaaren voidaan katsoa alkavan tuotesuunnittelusta ja päättyvän kierrätykseen tai loppusijoitukseen. Ympäristövaikutukset ovat eri tuoteryhmillä erilaisia elinkaaren kussakin vaiheessa; matkapuhelimella suurimmat ympäristövaikutukset aiheutuvat tuotannosta, kun taas televisiolla käytönaikaisesta toiminnasta.

Tuotesuunnittelun avulla pystytään vaikuttamaan erittäin tehokkaasti SE-laitteiden ympäristövaikutuksiin. Suunnitteluvaiheessa keskeisiä tavoitteita ympäristön kannalta ovat materiaalien käytön tehostaminen, energiakulutuksen minimointi, kierrätettävyyden parantaminen, haitallisten aineiden minimointi ja pitkäikäisyyden kehittäminen.

Lainsäädännössä määrätään, että SER:lle on luotava erillinen keräysjärjestelmä. Toimivan ja tehokkaan järjestelmän avulla taataan se, että mahdollisimman suuri osa käytöstä poistuvista SE-laitteista kerätään talteen. Useissa maissa tehtyjen pilottiprojektien mukaan tehokas keräysjärjestelmä edellyttää kuluttajille suunnattua tiedotusta, SE-laitteen ilmaista palautusmahdollisuutta ja useiden rinnakkaisten järjestelmien olemassaoloa. Tuottajilla on useita mahdollisuuksia hoitaa omien tuotteidensa kierrätys.

Käytön jälkeiset toiminnot käsittävät SE-laitteiden uudelleenkäytön, materiaalien kierrätyksen ja hyödyntämisen sekä loppusijoituksen. Materiaalien kierrätys on usein järkevin ja tehokkain tapa hoitaa SE-laitteiden käytön jälkeinen huolto. SE-laitteille tulee suorittaa manuaalinen esikäsittely, mikäli siinä esiintyy esim. ongelmajätteitä. Esikäsittelyn jälkeen SER:sta erotetaan eri materiaalit toisistaan erilaisten erotusprosessien avulla. Erotusprosesseina voidaan käyttää mekaanisia, hydrometallurgisia ja pyrometallurgisia menetelmiä. Myös manuaalinen erottelu (käsinsortaus) on mahdollinen.

Kierrätykseen kelpaamaton materiaali joko poltetaan tai sijoitetaan valvotulle kaatopaikalle. Polttoon ohjautuvat pääasiassa ongelmajätteet ja polttoon soveltuvat muovit, kaatopaikalle sijoitetaan polttoon kelpaamatonta muovia.

SE-laitteissa esiintyy lukuisia eri materiaaleja ja komponentteja, mikä tekee SER:n kierrättämisestä hankalaa. SER:n keskeisimmät materiaalit ovat metallit 57 %, muovit 22 % ja lasi 9 %. Eri tuoteryhmissä osuudet vaihtelevat myös huomattavasti.

Metalleista rautaa löytyy pääasiassa teräksen muodossa kylmälaitteissa, pesukoneissa ja tietokoneiden rungossa. Kuparia käytetään SE-laitteiden piirikorteissa ja kaapeleissa. Yli 50 % käytetään erilaisissa sähköjohteissa. Metallit ovat kierrätyksen kannalta erinomaisia materiaaleja, koska ne säilyttävät ominaisuutensa kierrätysprosessissa.

Muoveja käytetään mm. televisioiden ja monitoreiden kotelossa. Muovit ovat erittäin hankala kierrättää, koska ne sisältävät usein lisäaineita, kierrätetyille muoville ei ole olemassa markkinoita ja muovien ominaisuudet muuttuvat kierrätysprosessin aikana.

Lasia esiintyy televisioiden ja monitoreiden kuvaputkissa. Lyijyä sisältävän lasin kierrätys toteutetaan ohjaamalla murskattu lasi takaisin kuvaputkitehtaalte. Lyijyvapaa lasia voidaan kierrättää myös muulla tavoin.

Työssä pohdittiin myös, miten matkapuhelimessa muoviosien korvaaminen metalliosilla vaikuttaisi ympäristöön koko elinkaaren aikana. Matkapuhelimen elinkaareissa ympäristövaikutukset keskittyvät raaka-aineiden tuotantoon ja komponenttien valmistukseen.

Muovin korvaaminen metallilla aiheuttaa tuotantovaiheessa pienemmät päästöt ilmaan. Metallin valmistus kuluttaa myös vähemmän energiaa tonnia kohti, joten myös siltä kannalta metallit ovat ympäristöystävällisempiä. Ympäristövaikutuksiin tulisi ottaa tosin

huomioon myös materiaalien ominaispainot; tilavuudeltaan samankokoinen muoviosa painaa huomattavasti vähemmän kuin vastaava metallinen.

Muovin korvaaminen metallilla ei vaikuta käytön aikaisiin ympäristövaikutuksiin.

Käytönjälkeiset ympäristövaikutukset ovat metalleilla pienemmät kuin muoveilla. Kierrätetty materiaali vähentää primäärisen raaka-aineen tarvetta, mikä on ympäristön kannalta edullista. Metallit ovat helpommin kierrätettäviä kuin muovit, koska metallit säilyttävät ominaisuutensa kierrätysprosessissa. SE-laitteiden muovin kierrätys on hankalaa johtuen lukuisista eri muovilaaduista ja niiden sisältämistä ympäristölle vaarallisista lisäaineista.

Uudet direktiivit puoltavat myös muovien korvaamista metalleilla matkapuhelimissa mm. seuraavista syistä:

- kaatopaikkaus vähenee, koska metallit pystytään kierrättämään, kun taas muovit joudutaan usein sijoittamaan kaatopaikalle,
- metalleissa ei tarvitse käyttää bromattuja palonestoaineita sekä
- direktiivin asettamat kierrätystavoitteet on helpompi saavuttaa.

7 LÄHDELUETTELO

- /1/ Sähkö- ja elektroniikkateollisuusliitto. 1999. Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätyksen toteuttaminen, loppuraportti. Tammer-paino, Tampere.
- /2/ Kärnä, Anna. 1997. Ympäristömyönteinen tuotesuunnittelu. Sähkö- ja elektroniikkateollisuusliiton raportti.
- /3/ Euroopan komissio. 2000. Asiakirja 52000PC0347(01): Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta. Virallinen lehti nro C 365, s. 184-194.
- /4/ Euroopan komissio. 2000. Asiakirja 52000PC0347(02): Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa.
- /5/ Dammert, T. & Kuuva, M. 1995. Elektroniikkatuotteiden kierrätys. Espoo.
- /6/ Association of plastics manufactures in Europe. 2001. Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000.
- /7/ Fink, H., Panne, U., Theisen, M., Niessner, R., Probst, T. & Lin X. 2000. Determination of metal additives and bromine in recycled thermoplasts from electronic waste by TXRF analysis. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry 9/11/00, vol. 368 (Numbers 2/3), s. 235-239.
- /8/ <http://www.kuusakoski.fi/elrec>
- /9/ Vierailu Outokumpu Poricopper Oy:n tehtailla 8.1.2002.
- /10/ Vierailu Kuusakoski Oy:n Heinolan tehtailla 14.3.2002.
- /11/ Zhang, S. 1999. Recycling and processing of end-of-life electric & electronic equipment: fundamentals and applications. Luleå University of Technology.
- /12/ Henstock, Michael E. 1996. The recycling of non-ferrous metals. A publication by the The International Council on Metals and the Environment.
- /13/ Clark, Tom. 1999. Eco-design checklists for electronic manufacturers, systems integrators and suppliers of components and sub-assemblies. The Centre for Sustainable Design. Farnham, UK.
- /14/ SER-tuottajayhteisön toimitusjohtaja Timo Valkosen haastattelu 25.1.2002.

- /15/ Pellbäck Scharp, Mats. Matkapuhelimen elinkaari. Esitelmä FiCom:n ympäristöseminaarissa. 20.9.2000.
- /16/ Lohse, Joachim. 1998. Collection Targets for WEEE. Final Report for Environmental, Nuclear Safety and Civil Protection of the Commission of the European Communities.
- /17/ Hirvonen, Sami. 2000. Sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätys. Loppuraportti, YTI tutkimuskeskus. Mikkeli.
- /18/ Stevels, Ab & Boks Casper. Design for End of-Life Strategies and their implementation. To be published in Mechanical Life Cycle handbook: Good Environmental Design and Manufacturing.
- /19/ International Association of Electronic Recyclers. 2001. Design for Recycling & Reuse. Presentation in IAER roadmap development workshop.
- /20/ Dillon, Patricia. 2000. Recycling plastics from Electronics: Challenges & Opportunities. Presentation in IAER roadmap development workshop.
- /21/ Voorhees, Greg. 2000. Overview of recycling infrastructure. Presentation at NEMI (National Electronics Manufacturing Initiative) Recycling Forum.
- /22/ Electronic Industries Alliance. Recycling Technology Innovation. 2001. Presentation at EPR2 Conference.
- /23/ Smith, Brian. 2001. Should Metal Recyclables Be Defined as Hazardous Wastes? Ottawa.
- /24/ Bryce, Robert. 2001. Computer Compost. Inter@ctive Week, 12/02/2001, Vol. 8, Issue 6, s. 46-48.
- /25/ Gruenwald, Juliana. 2001. Getting the Lead Out. Inter@ctive Week, 21/05/2001, Vol.8, Issue 20, s. 20-22.
- /26/ Bendz, Diana. 2001. The Challenge of Electronics Recycling. Exclusive Q & A, Recycling Today Online Magazine. <http://www.recyclingtoday.com/>.
- /27/ Arensman, Russ. 2000. Ready for Recycling? Electronic Business, Vol. 26, Issue 12 s. 108-115.

- /28/ Yue, Ye. 2000. A decision making model for material management of end-of-life electronic products. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 19, Issue 2, s. 94-107.
- /29/ Vehlow, J., Bergfeldt, B., Hunsinger, H. & Jay, K. 2002. Recycling of bromine from plastics containing brominated flame retardants in state-of-the-art combustion facilities. A technical paper from APME (Association of Plastic Manufacturers in Europe).
- /30/ Furuholm, J., Yasuda, Y. & Trankell, R. 2000. Recycling of Telecommunication Products in Europe, Japan and USA.
- /31/ Rose, C. & Stevels, A. 2001. Metrics for End-of-Life Strategies (ELSEIM). Report from the Design for sustainability Research Group. Delft University of Technology.
- /32/ Eglise, T., De Lit, P., Delchambre, A. & Raucourt, B. 2000. Recycling of Electric and Electronic End-of-Life Devices: Economical Assessment Study in Brussels. Report from the Brussels Institute of Environment.
- /33/ Sodhi, M. & Reimer, B. 2001. Models for recycling end-of-life products. *OR Spektrum* Vol. 23, s. 97-115.
- /34/ Vierailu Ekokem Oy, Riihimäki.
- /35/ Hieber, M. & Hornberger, M. 1998. Handlungshilfen für Kommunen zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikalgeräten. Hauseigene Druckerei.
- /36/ Kujala, A., Kujala, K. & Oikarinen, A. Kannettavien elektroniikkalaitteiden materiaalit ja niiden prosessointi. *Vuoriteollisuus-lehti*, 4/2001, s. 41-47.
- /37/ Chryssos, G. Nationwide collecting and recycling of electrical and electronic equipment. Presentation at International Electronics Recycling Congress 10.1.2002.
- /38/ Silicon Valley Toxics Coalition. Poison PCs and Toxic TVs, Research Report 2001.
- /39/ Stevels, A. Experiences with take-back of white and brown goods in the Netherlands. Report in the Design for Sustainability Lab, Delft University of Technology.

- /40/ Stevels, A. & Boks, C. Lessons learned from 10 years take-back and recycling. Sustainability Research Group, Delft University of Technology.
- /41/ Skottheim, J. A clear and well defined producer responsibility. Presentation at International Electronics Recycling Congress. Davos 2002.
- /42/ Rose, C. & Stevels, A. Method for Formulating Product End-Of-Life Strategies for Electronics Industry. Accepted for publication in Journal of Electronics Manufacture, July 2001.
- /43/ Rose, C. & Stevels, A. Metrics for End-Of-Life Strategies (ELSEIM). Report in the Design for Sustainability Group, Delft University of Technology.
- /44/ Tanskanen, P. & Takala, R. Concept of a mobile terminal with active disassembly mechanism. Presentation at International Electronics Recycling Congress. Davos 2002.
- /45/ Zhang, S., Forssberg, E., Houwelingen, J., Rem, P. & Wei, L. 2000. End-of-life electric and electronic equipment management towards the 21th century. Waste Management & Research, numero 18, s. 73-85.
- /46/ Houwelingen, J. & Le Guern, C. Mechanical processing of low grade printed circuit board. Waste Management and Recycling, vol. 12, s. 9-17.
- /47/ Nokia Mobile Phonesin materiaali-insinööri Ari Oikarisen haastattelu 7.3.2002.
- /48/ CEFIC (European Chemical Industry Council), EACEM (European Association of Consumer Electronic Manufacturers, EECA (European Electronic Component Manufacturers Association), EICTA (European Information and Communication Technology Association) & EUROMETAUX (European Association of Metals. 2000. Guidance Document on the Appliance of Substances under Special Attention in Electric & Electronic Products.
- /49/ McLaren, J., Wright, L., Parkinson, S. & Jackson, T. 1999. A dynamic Life-cycle Energy Model of Mobile Phone Take-back and Recycling. Journal of Industrial Ecology, vol. 3, number 1, s. 77-91.
- /50/ Mark, F. & Lehner, T. Plastics Recovery from Waste Electrical & Electronic Equipment in Non-Ferrous Metal Processes. A technical paper from APME (Association of Plastic Manufacturers in Europe).

Teknillinen korkeakoulu
Materiaali- ja kalliotekniikan
osaston kirjasto
PL 6200 (Vuorimiehentie 2)
02015 TKK